

**Wirtschaftlichkeitsbewertung verschiedener Modi der
zukunftsweisenden Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik ETCS
anhand monetärer und nichtmonetärer Faktoren**

Diplomarbeit

Zur Erlangung des ersten akademischen Grades

Diplom-Wirtschaftsingenieurin (FH)

am Fachbereich Wirtschaftswissenschaften

der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden

im Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen

eingereicht von: Wenke Thim geb. am: 18.12.1986 in Altdöbern

eingereicht am: 04.10.2010

1. Gutachter: Prof. Dr. rer. pol. Hartmut Völcker

2. Gutachter: Dipl.-Inf. (FH) Thomas Böhm

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Vorgehensweise und Zielsetzung	2
2 Grundlagen	4
2.1 Abgrenzung von EIU und EVU	4
2.2 Leit- und Sicherungstechnik	4
2.3 European Train Control System (ETCS)	11
2.3.1 Allgemeines	11
2.3.2 Komponenten	12
2.3.3 Ausrüstungsstufen	14
3 Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen	18
3.1 Allgemeines	18
3.2 Lebenszykluskosten	19
3.3 Monetär erzielbarer Nutzen	27
3.4 Zusammenführung der monetären Faktoren	30
3.5 Nutzwertanalyse	33
4 Methoden zur Bestimmung eines Zielwertes der Lebenszykluskosten	36
4.1 Allgemeines	36
4.2 Analyse mittels Äquivalenzziffern	36
4.3 Angepasste Conjoint Analyse	38
4.4 Bestimmung anhand konkreter Kostenwerte	40
4.5 Auswahl einer Methode	41
5 Anwendungsbeispiel	42
5.1 Vorstellung der Szenarien	42
5.2 Kostenaufstellung	44
5.3 Trassenpreiseinnahmen	46
5.4 Zielwertbestimmung	48
5.5 Nutzwertanalyse	49
5.6 Auswertung	55
6 Zusammenfassung und Fazit	60
Quellenverzeichnis	62
Anlagenverzeichnis	70
Anlagen	71

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Leit- und Sicherungstechnik.....	5
Abbildung 2: Bedingungen für das Fahren im festen Raumabstand	6
Abbildung 3: Kabellinienleiter mit Kreuzungsstelle	10
Abbildung 4: ETCS Level 1	14
Abbildung 5: Level 1 Full Supervision.....	15
Abbildung 6: Level 1 Limited Supervision	15
Abbildung 7: ETCS Level 2	16
Abbildung 8: ETCS Level 3	17
Abbildung 9: Phasen des Lebenszyklus	19
Abbildung 10: Lebenszykluskosten der Eisenbahninfrastruktur	20
Abbildung 11: Kalkulatorischer Instandhaltungsaufwand.....	24
Abbildung 12: Lebenszykluskosten zur Bewertung von ETCS.....	26
Abbildung 13: Verteilung der Lebenszykluskosten	26
Abbildung 14: Ablauf einer Nutzwertanalyse	33
Abbildung 15: Beispielhafte Bildung der Kostendifferenz.....	39
Abbildung 16: Leistungsfähigkeit.....	50
Abbildung 17: Kaufpreis und Barwert der LCC	56
Abbildung 18: Barwert des Überschusses	57
Abbildung 19: Nutzwertanalyse	58
Abbildung 20: Portfolio-Darstellung	58

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispielhafte Anwendung der Äquivalenzziffern.....	37
Tabelle 2: Zusammenfassung der Szenarien	44
Tabelle 3: Lebenszykluskosten	46
Tabelle 4: Prozentualer Anteil der Trassenentgelte	47
Tabelle 5: Monetärer Nutzen und finanzielle Mittel für LST.....	48
Tabelle 6: Zielwertbestimmung.....	49
Tabelle 7: Höchstgeschwindigkeit	50
Tabelle 8: Sicherheit.....	51
Tabelle 9: Signalaufwertung	52
Tabelle 10: Rückfallebene	52
Tabelle 11: Interoperabilität	53
Tabelle 12: Gewichtung der Kriterien	53
Tabelle 13: Bewertung	55

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Der Verkehrsträger Schiene gewinnt in der Verkehrspolitik immer mehr an Bedeutung. Trotz des einheitlichen Wirtschaftsraumes ist ein grenzüberschreitender Verkehr aufgrund der Grenzen des Eisenbahnsystems nicht möglich. Um dieses Hindernis zu überwinden ist eine Integration der europäischen Bahnsysteme notwendig.

Eisenbahnsysteme der EU sind historisch bedingt nach wie vor national ausgerichtet. Über Jahrhunderte hinweg ist ihre technische Struktur entstanden. Somit ist heute in Europa eine Vielzahl von Zugbeeinflussungssystemen im Einsatz. Sie sind untereinander nicht kompatibel und schränken die Interoperabilität im Schienenverkehr ein. Daher müssen Züge, die in verschiedenen Netzen verkehren, über mehrere, netzspezifische Ausrüstungen verfügen. Diese Mehrfachausrüstungen führen zu erheblichen Kostensteigerungen und einem erhöhten Aufwand bei der Abwicklung des Schienenverkehrs.

Eine leistungsfähige und einheitliche Leit- und Sicherungstechnik ist demzufolge die Grundlage für eine effiziente Verkehrspolitik. Zur Lösung des Problems wurde von den europäischen Bahnbetreibern und der Bahnindustrie ein Zugbeeinflussungssystem entwickelt. Das Europäische Zugsteuerungssystem ETCS (European Train Control System) trägt wesentlich zur Steigerung der Interoperabilität zwischen den Ländern bei. In einigen Ländern Europas kommt ETCS bereits auf Neubaustrecken zum Einsatz. In technischer Hinsicht erfüllt das System die Erwartungen der Bahnindustrie. Die wirtschaftliche Rentabilität von ETCS konnte jedoch noch nicht nachgewiesen werden. Die Unsicherheiten beim Ausbau einer Strecke mit ETCS müssen von den Eisenbahninfrastrukturunternehmen getragen werden. Daher ist es erforderlich die Wirtschaftlichkeit von ETCS und deren unterschiedlichen Modi zu bestimmen.

1.2 Vorgehensweise und Zielsetzung

Eine umfassende Bewertung der Wirtschaftlichkeit von ETCS ist bisher nicht möglich gewesen. Die vorläufige Datenbasis reichte nicht aus, um eine methodisch begründete Analyse des Kosten-Nutzen-Verhältnisses verschiedener ETCS-Modi durchzuführen. Die Informationen zu den Kosten beschränken sich derzeit auf die Anschaffungsphase. Eine Abschätzung der Besitzkosten ist in Hinblick auf die lange Lebensdauer des Systems von großer Bedeutung. Zur Ermittlung eines Zielwertes der Lebenszykluskosten soll im Rahmen dieser Arbeit ein Verfahren entwickelt werden.

Die Leistungsfähigkeit einer Leit- und Sicherungstechnik ist maßgebend für die Wirtschaftlichkeit des Systems. Anhand der Leistungsfähigkeit können unter Anwendung des Trassenpreissystems der Deutschen Bahn AG die Einnahmen des Eisenbahninfrastrukturunternehmens ermittelt werden. Die Fakten zu den Lebenszykluskosten und dem aus der Infrastruktur resultierenden monetären Nutzen sind die Voraussetzung für eine umfassende Bewertung der Wirtschaftlichkeit. Im Verlauf dieser Arbeit soll eine Methode gefunden werden, mit deren Hilfe eine solche Wirtschaftlichkeitsbewertung durchgeführt werden kann.

Grundlage zur Bearbeitung der Diplomarbeit sind die verschiedenen ETCS-Modi sowie eine konventionelle Referenzausrüstung. Die Leistungswerte der Zugbeeinflussungssysteme und eine Abschätzung ihrer Anschaffungskosten wurden vom Institut für Verkehrssystemtechnik zur Verfügung gestellt.

Um einen Einstieg in das Thema zu erhalten, werden zunächst die grundlegenden theoretischen Fakten geklärt. Dabei werden die Unterschiede zwischen einem Eisenbahninfrastrukturunternehmen und einem Eisenbahnverkehrsunternehmen aufgezeigt. Diese Abgrenzung verdeutlicht, aus welchem Blickwinkel die Analysen durchzuführen sind. Zum besseren Verständnis der technischen Hintergründe werden der Aufbau und die Funktionsweise der Leit- und Sicherungstechnik erläutert. Das neue Zugsteuerungssystem ETCS wird ebenfalls vorgestellt. Eine Beschreibung der verwendeten Hardware-Komponenten sowie der unterschiedlichen Modi ist im Abschnitt 2.3 zu finden.

Nach Darlegung der Grundlagen der Leit- und Sicherungstechnik, beginnt in Abschnitt 3 die Analyse der Lebenszykluskosten. Zunächst ist zu klären, wie sich die Lebenszykluskosten im Allgemeinen zusammensetzen. Das Lebenszyklus-Modell einer Eisenbahninfrastruktur ist Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen. Dabei wird geprüft, in welcher Form dieses Modell auf die neue Technik angewandt werden kann. Ergebnis dieser Untersuchung sind die relevanten Kostenbestandteile einer ETCS-Ausrüstung. Weiterhin wird die vorhandene Datenbasis auf wesentliche Informationen zur Berechnung der Lebenszykluskosten untersucht.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil zur Untersuchung der Wirtschaftlichkeit ist der monetäre Nutzen. Dieser spiegelt sich in den Einnahmen des Eisenbahninfrastrukturunternehmens wieder. Auf Basis des Trassenpreissystems der Deutschen Bahn AG werden diese Einnahmen berechnet. Außerdem ist es erforderlich zu prüfen, ob weitere Faktoren, die Höhe des monetären Nutzens beeinflussen können.

Mit Hilfe der gesammelten Informationen soll eine Methode gefunden werden, die eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit verschiedener ETCS-Modi zulässt. Dabei wird auf bekannte Ansätze der Betriebswirtschaftslehre zurückgegriffen. Um die Wirtschaftlichkeit verschiedener Zugbeeinflussungssysteme ganzheitlich darzustellen, finden nicht nur die monetären Faktoren Berücksichtigung. Der nicht monetäre Nutzen kann ebenfalls eine große Rolle bei der Entscheidungsfindung spielen. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit eine Nutzwertanalyse durchgeführt.

Im Abschnitt 4 werden Verfahren vorgestellt, die es ermöglichen, einen Zielwert für die Lebenszykluskosten zu berechnen. Auf der Grundlage verschiedener Methoden des Kostencontrollings wurden diese Verfahren ausgewählt und auf das vorliegende Thema angepasst. Weiterhin kann auf die bisherigen Überlegungen zu den Lebenszykluskosten zurückgegriffen werden.

Im Abschnitt 5 wird ein konkretes Beispiel unter Anwendung der im Rahmen dieser Diplomarbeit beschriebenen Methoden vorgestellt. Die zu untersuchenden Szenarien sowie die grundlegenden Leistungsdaten wurden vom Institut für Verkehrssystemtechnik vorgegeben. Die Berechnungen zu den einzelnen Szenarien liefern entsprechende Zielwerte der Lebenszykluskosten sowie Aussagen über deren Wirtschaftlichkeit.

2 Grundlagen

2.1 Abgrenzung von EIU und EVU

Seit 1994 erfolgt eine strikte organisatorische Trennung zwischen Fahrweg und Fahrzeug. Der § 2 (1) AEG definiert die Eisenbahnen wie folgt:

„Eisenbahnen sind öffentliche Einrichtungen oder privatrechtlich organisierte Unternehmen, die Eisenbahnverkehrsleistungen erbringen (Eisenbahnverkehrsunternehmen) oder Eisenbahninfrastruktur betreiben (Eisenbahninfrastrukturunternehmen).“¹

Zu den Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) gehören z.B. die DB Regio AG und die DB Schenker Rail Deutschland AG.² Sie sind für die Beförderung von Personen bzw. Gütern zuständig. Das EVU muss gewährleisten, dass die vorhandene Verkehrsnachfrage bedient werden kann. Weiterhin ist es verpflichtet, seine Fahrzeuge und sein Zubehör in einem betriebssicheren Zustand zu erhalten und sicher zu führen.³

Unter Eisenbahninfrastruktur sind die Betriebsanlagen der Eisenbahnen sowie die Bahnstromfernleitungen zu verstehen. Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) sind als Betreiber für Betrieb, Bau und Unterhaltung der Schienenwege verantwortlich. Die Nutzung der Eisenbahninfrastruktur muss durch das EIU für jedermann und sicher gewährleistet werden.⁴ Für seine Leistungen erhält es von den EVU ein Nutzungsentgelt. Zu den EIU gehört beispielsweise die DB Netz AG.⁵

2.2 Leit- und Sicherungstechnik

Um den Schienenverkehr mit der geforderten Sicherheit zu betreiben, muss der Eisenbahnbetrieb gezielt gesteuert und überwacht werden. Dies soll mit der Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik gewährleistet werden.

Die Eisenbahn als Massentransportmittel ist mit hohen Sicherheitsanforderungen verbunden. Kennzeichnend für den schienengebundenen Verkehr sind außerdem die Spurführung und die langen Bremswege aufgrund geringer Haftreibung zwischen Fahrzeug und Fahrweg. Diese Merkmale haben einen erheblichen Einfluss auf die Systemgestaltung. Sie bedingen Maßnahmen zur Sicherung des Zugverkehrs und der Zugfolge. Der

¹ AEG (1994), § 2 (1)

² Vgl. Fiedler, J. (1999), S. 9

³ Vgl. AEG (1994), § 2, 4

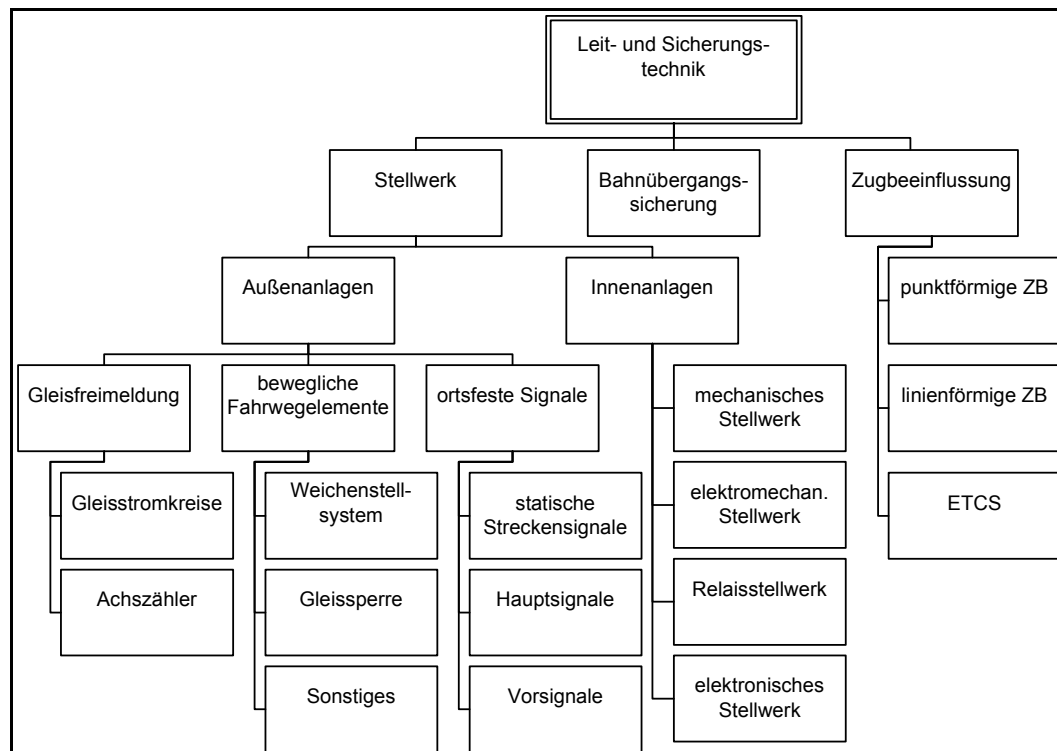
⁴ Vgl. ebenda

⁵ Vgl. Fiedler, J. (1999), S. 9

2 Grundlagen

Einsatz von Leit- und Sicherungstechnik (LST) ist erforderlich, um einen reibungslosen Ablauf des Eisenbahnbetriebes zu gewährleisten.⁶ Als ein Teil der Infrastruktur dient die LST der Sicherung, Automatisierung und Optimierung der Betriebsführung. Grundsätzlich setzt sich die LST aus einer Infrastrukturseite (vgl. Abbildung 1) und den fahrzeugseitigen Komponenten zusammen.⁷ Im Rahmen dieser Arbeit werden jedoch nur die Elemente der Infrastruktur betrachtet, da es sich um eine Bewertung der vom EIU bereitgestellten LST handelt. Daher finden bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung die fahrzeugseitigen Komponenten der EVU keine Berücksichtigung.

Abbildung 1: Leit- und Sicherungstechnik



Quelle: Vgl. Gutsche, K. (2010), S. 10

Aufgrund der langen Bremswege der Züge, wird das Fahren auf Sicht, wie es im Straßenverkehr üblich ist, nur bei sehr geringen Geschwindigkeiten angewendet. Die Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) schreibt im § 39 (3) das Fahren im festen Raumabstand vor.⁸ Bei diesem Verfahren wird ein konstanter Abstand (Raum) zwischen zwei aufeinander folgenden Zügen freigehalten. „Dieser Abstand muss mindestens dem maximalen Bremsweg für die höchstzulässige Geschwindigkeit entsprechen.“⁹

⁶ Vgl. Pahl, J. (2004), S. 1

⁷ Vgl. Lübke, D. (2008), S. 217

⁸ Vgl. EBO (2008), § 39

⁹ Pahl, J. (2004), S. 40

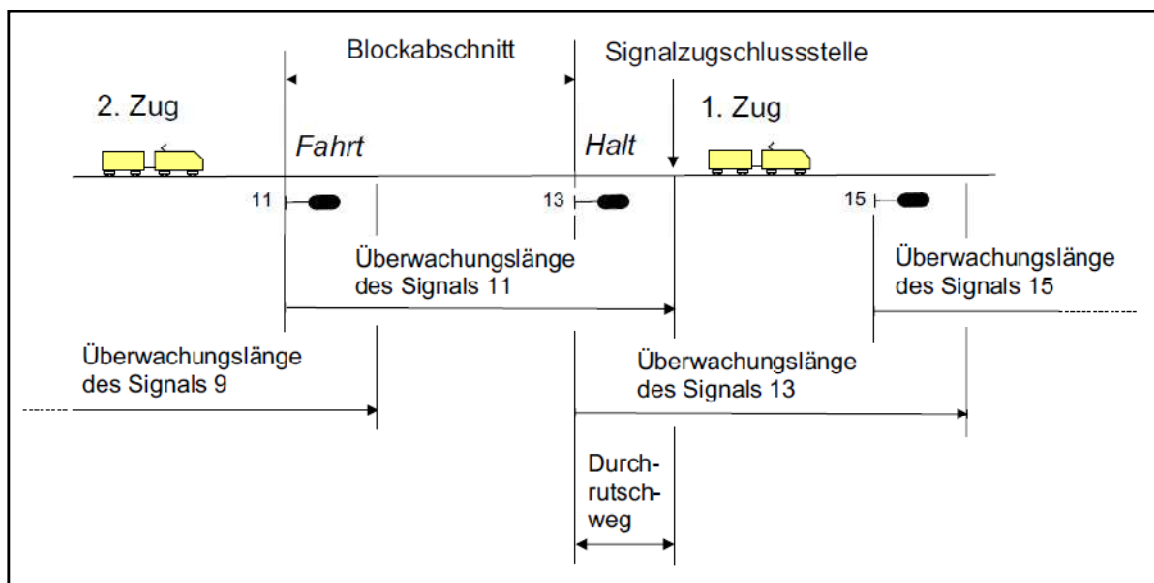
2 Grundlagen

Das Fahren im festen Raumabstand wird heute am häufigsten angewendet. Es ist ein weltweit verbreitetes Standard-Verfahren. Trotz der Versuche, neue Verfahren zu entwickeln, wird diese Abstandshaltetechnik noch lange bestehen bleiben. Daher soll es hier näher erläutert werden.¹⁰

Beim Fahren im festen Raumabstand ist die Strecke in Blockabschnitte geteilt und diese wiederum durch Hauptsignale abgesichert. Diese sogenannte ortsfeste Signalisierung ist dominierend bei den deutschen Eisenbahnen und kommt bei ca. 90 % des Streckennetzes zum Einsatz.¹¹ Unter dem Begriff Blockabschnitt „sind Gleisabschnitte, in denen ein Zug nur einfahren darf, wenn sie frei von Fahrzeugen sind“¹² zu verstehen. Ein Zug erhält erst Einfahrt in einen Blockabschnitt, wenn die folgenden Bedingungen, die sogenannten Streckenblockbedingungen (vgl. Abbildung 2), erfüllt sind:¹³

- Vor Einfahrt des Zuges in einen Blockabschnitt muss dieser frei sein, sodass sich immer nur ein Zug innerhalb eines Blockabschnittes befindet.
- Am Anfang eines jeden Blockabschnittes steht ein Signal. Der hinter diesem Signal befindliche Durchrutschweg muss ebenfalls frei sein.
- Ein vorausgefahrener Zug muss durch ein Halt zeigendes Signal gedeckt sein.

Abbildung 2: Bedingungen für das Fahren im festen Raumabstand



Quelle: Pachl, J. (2004), S. 43

¹⁰ Vgl. Pachl, J. (2004), S. 40 ff.

¹¹ Vgl. Lübke, D./Hecht, M. (2008), S. 506

¹² Pachl, J. (2004), S. 6

¹³ Vgl. Pachl, J. (2004), S. 42

2 Grundlagen

Diese Bedingungen sind klare Vorgaben, die eingehalten werden müssen, um ein gewisses Maß an Sicherheit zu erreichen. Die technische Umsetzung dieser Regeln kann durch verschiedene Verfahren realisiert werden. Zum einen gibt es Verfahren ohne technische Sicherung. Die Beachtung der Vorschriften erfolgt hier durch den Menschen. „Die mit der Regelung der Zugfolge beauftragten Mitarbeiter kommunizieren untereinander mittels Fernmeldeeinrichtungen, Funk oder speziellen Telegrafen.“¹⁴ Die Sicherheit ist demzufolge vom menschlichen Handeln abhängig. Je nach Organisationsform lassen sich die Verfahren ohne technische Sicherung in Verfahren mit örtlicher oder zentraler Fahrdienstleitung unterscheiden.¹⁵

Bei technischen Sicherungsverfahren wird die Sicherheit mit Hilfe von Streckenblockanlagen hergestellt. Ein Streckenblock ist eine Verschlusseinrichtung. Sie ermöglicht die Herstellung von Abhängigkeiten zwischen Blockstellen (z.B. Bahnhöfe, Abzweigstellen, Überleitstellen, usw.), die einen Blockabschnitt begrenzen.¹⁶ Streckenblöcke lassen sich nach ihrer Ausführungsform in nicht selbsttätigen und selbsttätigen Streckenblock unterscheiden. Bei nicht selbsttätigen Streckenblöcken sind noch keine technischen Anlagen zur Gleisfreimeldung vorhanden. Die Zugvollständigkeit kann nur durch Beobachten eines Mitarbeiters überprüft werden. Daher müssen beim nicht selbsttätigen Streckenblock alle Zugfolgestellen örtlich mit Personal besetzt sein.

Selbsttätige Streckenblöcke hingegen erfordern kein Mitwirken des Menschen. Sie werden durch Gleisfreimeldeanlagen realisiert. Dabei werden die Blockabschnitte und Durchrutschwege technisch auf Freiheit von Zügen überprüft. Als Gleisfreimeldeanlagen können Gleisstromkreise oder Achszähler verwendet werden. Dank der Entwicklung des Mobilfunks ist heute auch eine funkbasierte Zugfolge-sicherung möglich. Diese macht die Gleisfreimelde- und Streckenblocksysteme überflüssig. In Zukunft ist somit auch eine Zugführung über Führerstandsanzeigen ohne ortsfeste Blockabschnitte denkbar.¹⁷

Aufgabe der Streckenblockanlagen ist die Realisierung eines Folgefahr-schutzes und eines Gegenfahr-schutzes. Der Folgefahr-schutz soll gewährleisten, dass ein nachfolgender Zug nicht in einen bereits besetzten Blockabschnitt einfahren kann. Das Signal am Anfang des Blockabschnitts muss in Haltstellung verschlossen werden (Deckung des Zuges). Gleichzeitig wird die nächste Zugmeldestelle über die Beset-

¹⁴ Pachl, J. (2004), S. 58

¹⁵ Vgl. ebenda

¹⁶ Vgl. Pachl, J. (2004), S. 7, 62

¹⁷ Vgl. Lübke, D./Hecht, M. (2008), S. 516 ff.

zung des Blockabschnittes informiert (Vorblokung). Der Signalverschluss bleibt solange bestehen, bis eine Einfahrt in den Blockabschnitt wieder möglich ist (Rückblockung). Nach erfolgreicher Prüfung auf Freiheit des Blockabschnittes und des Durchrutschweges sowie deren Freimeldung wird das Signal auf Fahrt gestellt (vgl. Anlage 1).¹⁸

Ist im Zweirichtungsbetrieb die Gegenfahrt zugelassen, so muss gewährleistet werden, dass zwei Fahrzeuge in einem Streckenabschnitt nicht aufeinander zufahren (Gegenfahrtschutz). Daher ist der Wechsel der Fahrtrichtung nur bei freier Strecke zulässig. Um dies zu ermöglichen werden alle in einen Streckenabschnitt weisenden Signale der angrenzenden Zugmeldestellen in Haltstellung verschlossen. Nun kann die Fahrtrichtung geändert und der Streckenabschnitt für einen Zug wieder freigegeben werden (vgl. Anlage 2).¹⁹

Zusätzlich müssen die Bereiche abgesichert werden, an denen sich Fahrwege kreuzen und verzweigen. Die Fahrwegsicherung dient dem Schutz vor Entgleisungen und Zusammenstößen durch falsch gestellte Fahrwegelemente. Daher verkehren Züge in Weichenbereichen der Fahrstraßenknoten (Bahnhöfe, Abzweig- und Überleitstellen) auf technisch gesicherten Wegen, den sogenannten Fahrstraßen. Eine Fahrstraße wird meist zwischen zwei aufeinander folgenden Hauptsignalen gebildet. Sind Fahrstraßen für eine Zugfahrt freigegeben, müssen sich die Weichen und Flankenschutzeinrichtungen in der für diese Zugfahrt erforderlichen Lage befinden. Weiterhin müssen diese Elemente für die Zeit der Zugfahrt verschlossen sein. Dieser Verschluss gewährleistet zum einen, dass ein Umstellen der Weichen und Flankenschutzeinrichtungen nicht möglich ist. Zum anderen werden die Weichen vor Ort gegen unbeabsichtigte Bewegungen formschlüssig festgehalten (Weichenverschluss). Erst wenn diese Bedingungen erfüllt sind, ist es technisch möglich, das Hauptsignal auf Fahrt zu stellen und somit die Fahrstraße freizugeben. Dies wird in der Bahntechnik als Signalabhängigkeit bezeichnet.²⁰

Zur Durchführung dieser Schalt- und Stellvorgänge sind Stellwerke erforderlich. Diese Einrichtungen zur Bedienung von Weichen und Signalen können örtlich organisiert oder über eine Zentrale ferngesteuert werden. Im Laufe der Zeit haben sich unterschiedliche Stellwerksformen herausgebildet. Die älteste Bauart sind die mechanischen Stellwerke. Die im Stellwerk befindlichen Hebel werden über Drahtzug-

¹⁸ Vgl. Pachl, J. (2004), S. 63; Fendrich, L. (2007), S. 629 f.

¹⁹ Vgl. Pachl, J. (2004), S. 64 f.; Fendrich, L. (2007), S. 630

²⁰ Vgl. Lübke, D./Hecht, M. (2008), S. 521 ff.

leitungen mit den Weichen und Signalen verbunden. Die Bedienung der Hebel erfolgt allein über die Muskelkraft des Menschen. Elektromechanische Stellwerke hingegen besitzen bereits elektromotorische Antriebe, mit deren Hilfe Weichen und Signale gestellt werden können. Diese Antriebe werden aus den Stellwerken über einen Elektromotor mit Stellstrom versorgt. Daher sind hier bereits größere Stellentfernungen erreichbar. Eine weitere Generation von Stellwerken bilden die Relaisstellwerke. Alle sicherungstechnischen Abhängigkeiten werden hier vollständig elektrisch über Relaischaltungen hergestellt. Das ist eine wesentliche Erneuerung gegenüber den mechanischen Verschlussregistern der mechanischen und elektromechanischen Stellwerke. Die Bedienung erfolgt über Tasten und Meldeleuchten, die in einem schematischen Gleisbild angeordnet sind. Daher werden Relaisstellwerke auch häufig als Gleisbild- oder Drucktastenstellwerke bezeichnet. Große Knoten oder ganze Strecken können aus einer Zentrale überwacht und gesteuert werden. Relaisstellwerke bieten eine deutlich höhere Sicherheit gegenüber den alten Bauformen. Die modernste Bauform sind die elektronischen Stellwerke. „Von der Deutschen Bahn AG werden nur noch elektronische Stellwerke beschafft.“²¹ Dabei handelt es sich um computergesteuerte Stellwerke, deren Stellwerkslogik über Software realisiert wird. Daher gewährleisten auch sie eine hohe Sicherheit. Üblicherweise werden sie über Bildschirmarbeitsplätze aus Zentralen ferngesteuert.²²

Die Bedingungen für das Fahren im festen Raumabstand müssen zwingend eingehalten werden. Voraussetzung dafür ist die konsequente Einhaltung der Signale. Um ein hohes Maß an Sicherheit zu erzielen, wird dies durch spezielle technische Einrichtungen kontrolliert. Mit Hilfe von Zugbeeinflussungsanlagen werden Informationen über die zulässige Fahrweise vom Fahrweg auf das Fahrzeug übertragen und deren Beachtung überprüft. Wird von der zulässigen Fahrweise abgewichen (Geschwindigkeitsüberschreitung, Überfahren Halt zeigender Signale), werden auf dem Fahrzeug Schutzreaktionen, zumeist Zwangsbremssungen, eingeleitet. Menschliches Versagen kann damit weitestgehend ausgeschlossen werden.²³ Zugbeeinflussungsanlagen können nach der Art der Informationsübertragung eingeteilt werden in:²⁴

- punktförmig wirkende Systeme,
- linienförmig wirkende Systeme,
- Systeme mit punkt- und linienförmigen Bestandteilen.

²¹ Lübke, D./Hecht, M. (2008), S. 529

²² Vgl. Lübke, D./Hecht, M. (2008), S. 527 ff.

²³ Vgl. Pacht, J. (2004), S. 75

²⁴ ebenda

2 Grundlagen

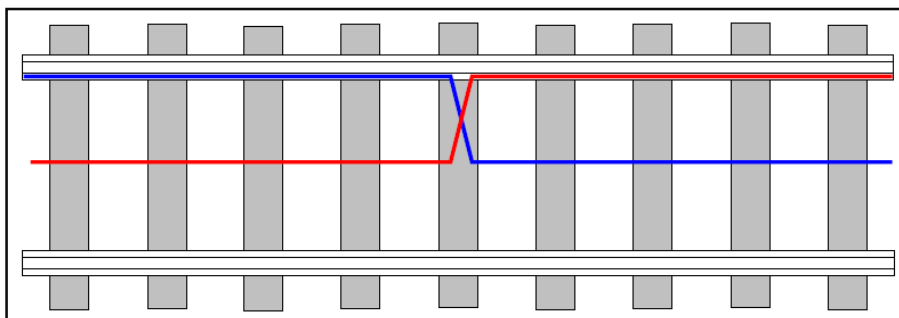
Bei der punktförmigen Zugbeeinflussung (PZB) erfolgt eine Übermittlung von Daten an diskreten Punkten. Als Ergänzung zu den ortsfesten Signalen überwacht sie die Einhaltung der Signalinformation durch den Triebfahrzeugführer. Die PZB 90, eine Standardbauart bei der Deutschen Bahn AG, ist eine induktive Zugbeeinflussung. Durch elektromagnetische Induktion werden Informationen auf das Fahrzeug übertragen. Da bei Annäherung an das Signal der Wechsel in die Fahrtstellung nicht übertragen werden kann, ist eine selbsttätige Führung des Triebfahrzeuges nicht möglich.²⁵

Linienförmige Systeme hingegen übertragen die Informationen vom Fahrweg auf das Fahrzeug kontinuierlich. Auf eine ortsfeste Signalisierung entlang der Strecke kann in diesem Fall verzichtet werden. Die Streckeninformationen und Signalbegriffe (Fahrt, Halt, Halt erwarten) werden im Führerstand mittels digitaler und analoger Anzeigeelementen angezeigt (Führerstandssignalisierung). Die Eisenbahn-Bau- und -Betriebsordnung schreibt, gemäß § 15, bei Geschwindigkeiten von über 160 km/h eine linienförmige Zugbeeinflussung vor.²⁶

Grundsätzlich gibt es drei Bauformen mit denen die linienförmige Zugbeeinflussung (LZB) realisiert werden kann:

- LZB mit Kabellinienleiter (vgl. Abbildung 3)
- LZB mit codierten Gleisstromkreisen
- Funkzugbeeinflussung.

Abbildung 3: Kabellinienleiter mit Kreuzungsstelle



Quelle: Lübke, D. (2008), S. 532

²⁵ Vgl. Pacht, J. (2004), S. 75; Lübke, D./Hecht, M. (2008), S. 529 f.

²⁶ Vgl. EBO (2008), § 15

2 Grundlagen

Die Deutsche Bahn AG verwendet hauptsächlich Kabellinienleiter. Ein zwischen den Schienen verlegtes Kabelpaar dient als Antenne und ermöglicht den Datenaustausch. Dabei werden folgende Führungsgrößen übertragen:

- örtlich zulässige Geschwindigkeit
- Zielentfernung bis zum nächsten Geschwindigkeitswechsel
- Zielgeschwindigkeit.

Sie bilden die Grundlage zur Berechnung der Bremskurve der Züge. Alle 100 m werden die Adern der Kabelschleife gekreuzt (Kreuzungsstelle), um die Ortung der Züge zu ermöglichen.²⁷

Die Zugbeeinflussung kann auch durch eine Kombination aus punktförmigen und linienförmigen Elementen realisiert werden. Dabei werden die linienförmigen Systeme nur im Bereich der Signalstandorte eingerichtet. Dies ermöglicht eine rechtzeitige Übertragung des nachträglich aufgewerteten Signalbegriffs. Auf offener Strecke genügt die Installation punktförmig wirkender Systeme. Diese Variante kommt vor allem aus wirtschaftlichen Gründen zum Einsatz, um Kosten zu sparen.

2.3 European Train Control System (ETCS)

2.3.1 Allgemeines

ERTMS (European Rail Traffic Management System) wurde entwickelt, um die Interoperabilität des Schienenverkehrs in Europa zu fördern. Bestandteile dieses europäischen Eisenbahnverkehrsleitsystems sind ETCS und das Funksystem GSM-R. ETCS übernimmt dabei die Funktion der Zugsicherung und stellt sicher, dass die vorgeschriebene Geschwindigkeit eingehalten und der Zug, wenn nötig, automatisch abgebremst wird.

Bisher kommen im europäischen Schienenverkehr 20 verschiedene Zugsicherungssysteme zum Einsatz.²⁸ Unterschiedliche Stromsysteme und unterschiedliche Schnittstellen zwischen Fahrzeug und Fahrweg behindern den grenzüberschreitenden Verkehr.

²⁷ Pachl, J. (2004), S. 83; Lübke, D./Hecht, M. (2008), S. 531 ff.

²⁸ Vgl. EU-Kommission (2008)

Daher müssen die Fahrzeuge häufig mit mehreren Systemen ausgerüstet werden und verursachen somit höhere Kosten. „So ist der zwischen Paris und Brüssel verkehrende Thalys mit sieben solcher Systeme ausgerüstet.“²⁹ Diese Mehrsystemausrüstung verursachte bei seiner Herstellung um 60% höhere Kosten je Zug.³⁰

Mit Hilfe von ETCS wird ein einheitliches Zugsicherungssystem geschaffen. Langfristig können somit die Kosten für den Betrieb und die Instandhaltung gesenkt werden. Gleichzeitig soll es eine Erhöhung der Sicherheit garantieren. ETCS kann zu einer Steigerung der Streckenleistungsfähigkeit führen. Dadurch ist eine Verkürzung der Beförderungszeit um 20 % und eine Steigerung der Zuverlässigkeit um 26 % realisierbar.³¹ Der Verkehrsträger Schiene kann somit in seiner Attraktivität und Sicherheit verbessert werden.

2.3.2 Komponenten

ETCS besteht aus verschiedenen Komponenten, mit deren Hilfe die Zugsicherung realisiert wird.

Eurobalisen

Eurobalisen sind punktförmig wirkende Übertragungseinrichtungen. Sie werden als Kompaktbaugruppe mittig im Gleis angebracht und übermitteln Informationen an das ETCS-Fahrzeuggerät. Dies erfolgt nach dem Transponderprinzip durch elektromagnetische Induktion. Eurobalisen werden in Festdatenbalisen und transparente Balisen unterschieden. Festdatenbalisen sind nicht schaltbare Balisen (fixe Balisen), die immer die gleichen Informationen übertragen (z.B. Streckenkilometrierung). Transparente Balisen hingegen können auch veränderbare Informationen übertragen und werden daher als schaltbare Balisen bezeichnet. Sie werden vor allem zur Übertragung von Signalstellungen verwendet.³²

²⁹ Vgl. EU-Kommission (2006)

³⁰ ebenda

³¹ Vgl. Bartnicki, K./Rahn, W. (2010), S. 24

³² Vgl. Pahl, J. (2004), S. 87; Wegener, M. (2008)

Euroloop

Als linienförmiges Übertragungselement wird Euroloop zur Aufwertung von punktförmig übertragenen Daten eingesetzt. Damit ist eine kontinuierliche Informationsübertragung möglich. Euroloops sind im Gleis verlegte Kabelantennen mit einer Länge von maximal 1000 m. Sie werden für begrenzte Entfernungen eingesetzt.³³

Lineside Electronic Unit (LEU)

Die Lineside Electronic Unit ist eine Signalschalteinheit, die in einem Signalschaltkasten oder in einem separaten Gehäuse am Signal angebracht wird. Sie verbindet die transparenten Balisen bzw. die Euroloops mit den streckenseitigen Signalen. Über das Signalkabel wird der Signalbegriff aus dem Lampenstromkreis erfasst. In einem Telegrammspeicher sind verschiedene codierte Telegramme hinterlegt, aus denen je nach Signalbegriff das passende Telegramm herausgesucht wird. Dieses Telegramm umfasst im Wesentlichen die Fahrerlaubnis, auch Movement Authority genannt. Es kann aber auch zusätzliche Informationen zum Fahrweg enthalten (z.B. Ort und Länge eines Tunnels, einer Brücke).³⁴

Euroradio

Mit Hilfe einer GSM-R-Funkverbindung können Daten zwischen Fahrzeugen und zwischen Fahrzeug und Streckenzentrale übertragen werden. Dabei handelt es sich um eine spezielle Weiterentwicklung des Mobilfunksystems GSM für die Eisenbahn. Es ermöglicht eine kontinuierliche Übertragung von wichtigen sicherheitsrelevanten Informationen. Die Schnittstelle zwischen dem Zug und der Funkeinrichtung ist standardisiert. Dies trägt im Wesentlichen zur Interoperabilität bei.³⁵

Radio Block Center (RBC)

Ein Radio Block Center ist eine Streckenzentrale. Vom Stellwerk bekommt es den aktuellen Status der Stellwerkselemente (Gleisfreimeldung, Weichen und Signale) übermittelt. Aus diesen Fahrstraßeninformationen ermittelt das RBC die Fahrerlaubnis (Movement Authority). Diese wird dann per GSM-R an den Zug übertragen.³⁶

³³ ebenda

³⁴ Vgl. Siemens AG (2010)

³⁵ Vgl. Pacht, J. (2004), S. 87; Siemens AG (2010)

³⁶ Vgl. Bartnicki, K./Rahn, W. (2010), S. 24

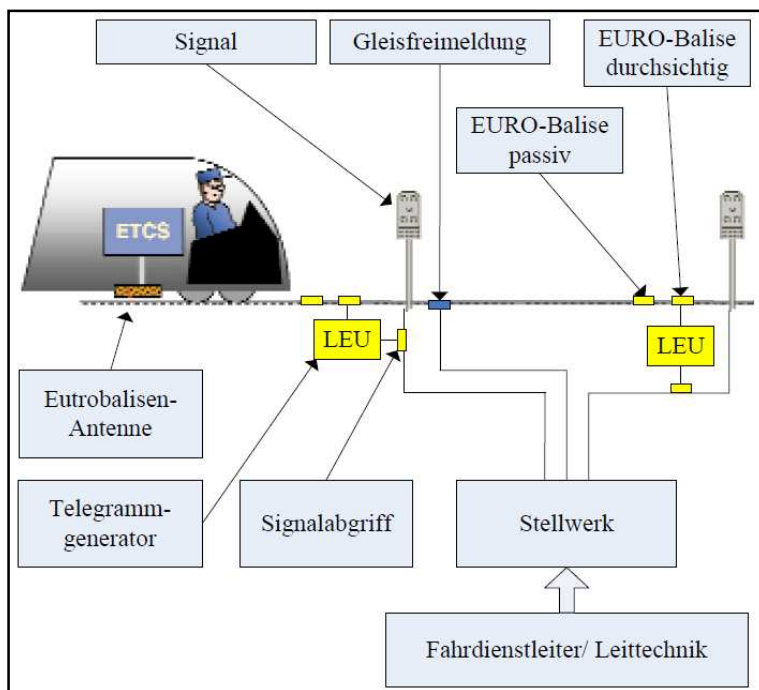
2.3.3 Ausrüstungsstufen

ETCS gibt es in drei unterschiedlichen Ausbaustufen, sogenannten Level. Ein Level zeichnet sich durch seine jeweiligen Komponenten aus. In allen Ausrüstungsstufen wird das Triebfahrzeug mit einer einheitlichen Fahrzeugeinrichtung ausgestattet, dem sogenannten Eurocab. Sie ermöglicht eine standardisierte Anzeige im Triebfahrzeug.

Level 1

Bei ETCS Level 1 kommen die Eurobalisen zum Einsatz. Sie ermöglichen eine Aufwertung des Signalbegriffs an diskreten Punkten. Die Information über die Stellung des Signals und die Aufhebung des Fahrverbots wird durch standardisierte Telegramme an die Fahrzeugkomponente übertragen. Die Telegrammerstellung erfolgt in der LEU (vgl. Abbildung 4).³⁷

Abbildung 4: ETCS Level 1



Quelle: Krüger, M. (2003), S. 29

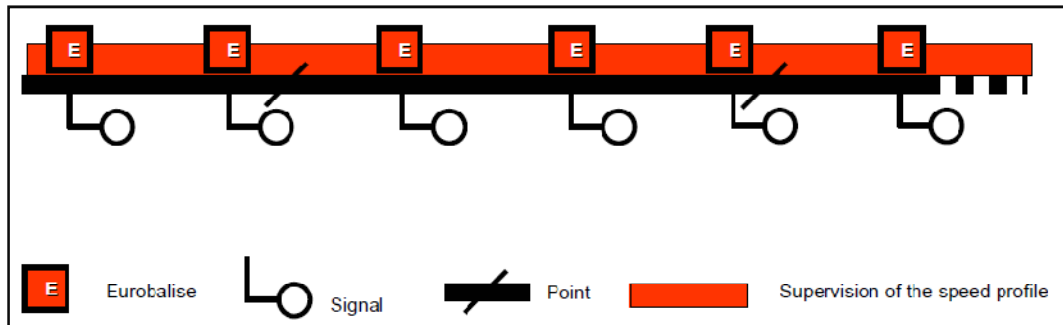
Im Level 1 kann zwischen den Modi Full Supervision und Limited Supervision unterschieden werden. Level 1 Full Supervision (vgl. Abbildung 5) wird dem bestehenden Signalsystem überlagert. Jedes Signal wird vollständig mit ETCS ausgerüstet. Somit ist eine Übertragung der streckenseitigen Daten (z.B. Geschwindigkeit, Gradient) und die Aufwertung der Signalbegriffe punktuell über die Balisen möglich. Mit Hilfe dieser Daten

³⁷ Vgl. Pahl, J. (2004), S. 88

2 Grundlagen

berechnet und überwacht der Fahrzeugrechner kontinuierlich die zulässige Geschwindigkeit und die Bremskurve des Zuges (Bremskurvenüberwachung). Eine Anzeige der Informationen im Führerstand (Führerstandssignalisierung) ist ebenfalls möglich. Die streckenseitigen Signale können daher bei Level 1 Full Supervision prinzipiell vernachlässigt werden.³⁸

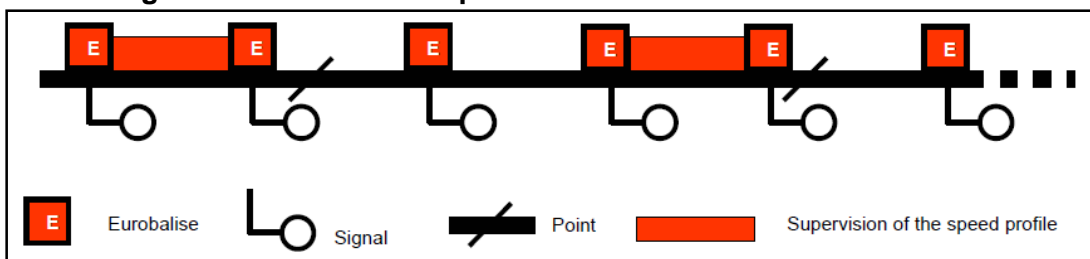
Abbildung 5: Level 1 Full Supervision



Quelle: Hänni, H. (2004)

Level 1 Limited Supervision (vgl. Abbildung 6) ist ein Modus ohne Führerstandsanzeige. Die Bremskurvenüberwachung erfolgt nicht kontinuierlich, sondern kommt nur an hoch riskanten Stellen zum Einsatz. Limited Supervision stellt eine vereinfachte und kostengünstigere Art der Zugbeeinflussung dar. Sie soll die bisherige punktförmige Zugbeeinflussung (PZB 90) ablösen und kann als Übergangslösung bis zur vollständigen Migration von ETCS eingesetzt werden.³⁹

Abbildung 6: Level 1 Limited Supervision



Quelle: Hänni, H. (2004)

Level 2

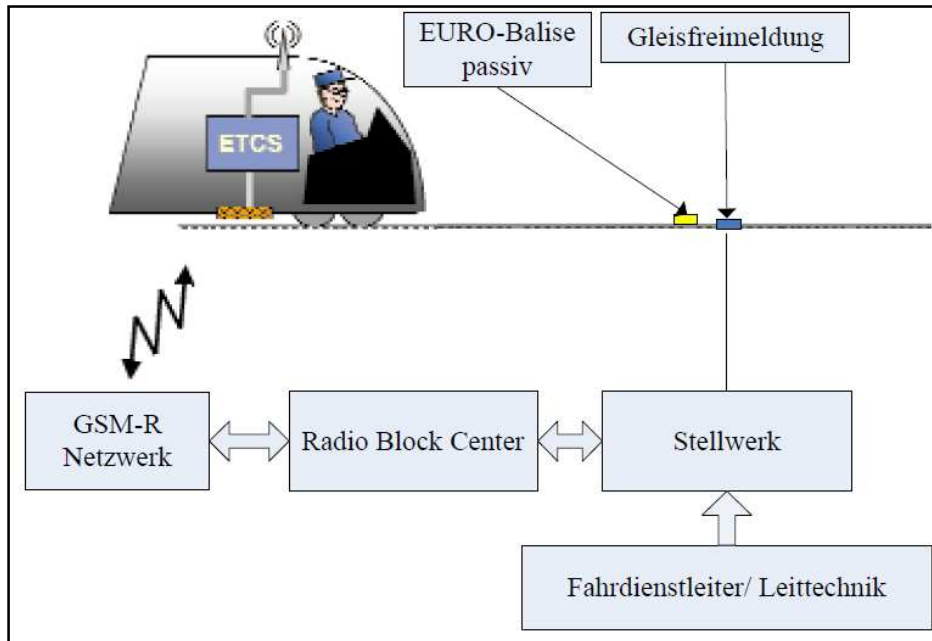
Im Level 2 erfolgt eine kontinuierliche Zugbeeinflussung mittels Funk (vgl. Abbildung 7). Dafür wird das speziell für die Eisenbahn weiterentwickelte Mobilfunksystem GSM-R verwendet. Das Streckenprofil und weitere Daten werden durch die zentrale Funkeinheit RBC übertragen. Bei Level 2 ist eine Führerstandssignalisierung vorge-

³⁸ Vgl. Hänni, H. (2004)

³⁹ Vgl. Hänni, H. (2004); DB Netz AG (o.J.)

sehen. Streckenseitige Signale werden nicht mehr benötigt. Sie können jedoch optional bestehen bleiben (z.B. als Rückfallebene oder für Züge, die keine Level 2-Ausrüstung haben). Die Gleisfreimeldung wird wie bisher mittels Gleisstromkreise oder Achszähler realisiert. Mit Hilfe einer Kombination aus Odometer und der nicht schaltbaren Balisen können sich die Züge im Gleis orten. Sie übernehmen die Funktion von Ortsmarken und werden daher elektronische Kilometersteine genannt.⁴⁰

Abbildung 7: ETCS Level 2



Quelle: Krüger, M. (2003), S. 29

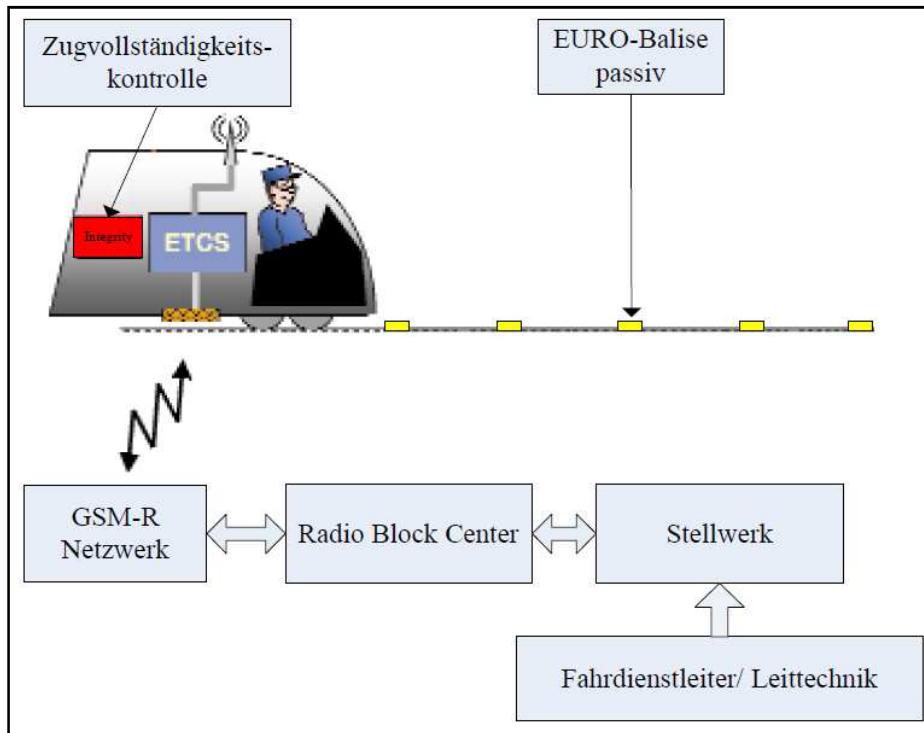
Level 3

Im Level 3 wird konsequent auf ein Streckensignalsystem verzichtet (vgl. Abbildung 8). Auch die ortsfeste Gleisfreimeldung ist nicht mehr erforderlich. Die Zugvollständigkeit wird hier fahrzeugseitig überprüft. Die technische Realisierung ist für Güterzüge noch nicht abschließend geklärt. Level 3 verzichtet auf ein Fahren im festen Raumabstand. Der erforderliche Sicherheitsabstand wird permanent durch eine funkbasierte Zugfolgesicherung überprüft. Somit kann der Zugbetrieb im Bremswegabstand, dem sogenannten Moving Block, realisiert werden. Die Datenübertragung erfolgt wie bei Level 2 mit Hilfe von GSM-R. Die Zugortung wird von nicht schaltbaren Balisen übernommen. Auch hier ist eine Führerstandsanzeige vorgesehen.⁴¹

⁴⁰ Vgl. o.V. (o.J.); Wegener, M. (2008)

⁴¹ Vgl. Pahl, J. (2004), S. 88; Wegener, M. (2008)

Abbildung 8: ETCS Level 3



Quelle: Krüger, M. (2003), S. 29

3 Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen

3.1 Allgemeines

Die Wahl der Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik kann sich stark auf die wirtschaftliche und betriebliche Qualität einer Strecke auswirken. Daher sollte die Entscheidung über eine Investition mit höchster Sorgfalt getroffen werden. Mit Hilfe von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen können verschiedene Alternativen verglichen und die wirtschaftlichste Variante ausgewählt werden. Im Mittelpunkt solcher Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen stehen hauptsächlich monetäre Faktoren. Diese sind zumeist konkret bestimmbar und haben den größten Einfluss auf eine Investitionsentscheidung. Dabei ist es wichtig, nicht nur die Kostenseite zu berücksichtigen, sondern auch den monetär erzielbaren Nutzen zu bestimmen. Unter dem Begriff monetäre Faktoren werden daher die Lebenszykluskosten und die erwirtschafteten Einnahmen zusammengefasst. Sie können als direkte Zahlenwerte in die Wirtschaftlichkeitsbewertung einfließen.

Dennoch gibt es Faktoren, die nicht durch monetäre Größen ausgedrückt werden können. Über den monetären Nutzen hinaus sind Qualitätskriterien, die sich nicht zahlenmäßig bestimmen lassen, relevant. Zu den Qualitätskriterien einer Eisenbahninfrastruktur zählen z.B. die Streckengeschwindigkeit und die Sicherheit auf der Strecke. Der Nutzen einer Investitionsalternative ist vorrangig von solchen Kriterien abhängig und lässt sich mit Hilfe von qualitativen Parametern beschreiben. Gerade bei der Bewertung der LST können die qualitativen und leistungsspezifischen Unterschiede zwischen den einzelnen Alternativen einen wesentlichen Einfluss auf die Investitionsentscheidung haben. Eine Methode zur Bewertung der nicht monetären Faktoren ist die Nutzwertanalyse. Sie ermöglicht es, den qualitativen Nutzen einer Alternative durch konkrete Zahlenwerte auszudrücken. Die Nutzwertanalyse wird im Abschnitt 3.5 näher erläutert.

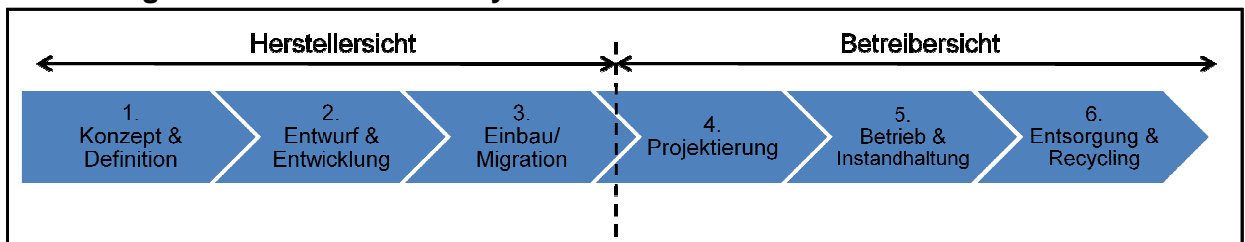
Um mit Hilfe von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen ein repräsentatives Ergebnis zu erzielen, müssen sowohl monetäre als auch nicht monetäre Parameter Berücksichtigung finden. Anhand traditioneller Methoden der Investitionsrechnung können die monetären Größen bewertet werden. Eine nutzwertanalytische Bewertung der nicht monetären Faktoren bildet eine gute Ergänzung zu den finanzanalytischen Betrachtungen. Somit kann die Wirtschaftlichkeit der Alternativen ganzheitlich abgebildet werden.

3.2 Lebenszykluskosten

Aufgrund der langen Lebensdauer und der Komplexität des Systems Bahn ist die Entscheidung über eine Investition mit weitreichenden Folgen verbunden. Mit dem Kauf einer Infrastruktur wird der Betreiber über lange Zeit an die Betriebskosten eines Systems gebunden. Doch Produkte, die in ihrer Anschaffung zunächst günstig erscheinen, können auf lange Sicht sehr teuer werden. Daher werden im Bereich der Schieneninfrastruktur die Lebenszykluskosten (LCC) herangezogen, um eine genaue Abbildung der Kosten über den gesamten Lebenszyklus zu erzielen. Sie bilden die Basis für die Investitionsentscheidungen.

Die DIN EN 60300-3-3 gibt einen Einblick in die Ermittlung der Lebenszykluskosten. Demnach sind diese definiert als „kumulierte Kosten eines Produktes über seinen Lebenszyklus“⁴². Unter dem Lebenszyklus kann die Entwicklung eines Produktes über einen bestimmten Zeitraum verstanden werden. Er gliedert sich in sechs Phasen (vgl. Abbildung 9).⁴³

Abbildung 9: Phasen des Lebenszyklus



Quelle: Böhm, T./Scheier, B. (2010), S. 33

Wie in der Abbildung 9 ersichtlich, wird der Lebenszyklus eines Produktes grob unterteilt in die Hersteller- und die Betreibersicht. Da in dieser Arbeit die Wirtschaftlichkeit von ETCS aus Sicht eines EIU beurteilt wird, steht die Betreibersicht im Mittelpunkt. Ziel des Betreibers ist es, ein Produkt mit einem möglichst hohen Nutzen, der zum Unternehmenserfolg beiträgt, anzubieten. Die dafür notwendige Infrastruktur soll zu möglichst geringen LCC bereitgestellt werden.

⁴² Deutsches Institut für Normung (2005), S. 6

⁴³ Vgl. Deutsches Institut für Normung (2005), S. 7

3 Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen

Die Entscheidung über eine Investition wird nicht nur durch die Beschaffungskosten beeinflusst. Der größte Anteil der Kosten fällt während des Besitzes für den Betrieb und die Instandhaltung eines Produktes an. Weiterhin müssen die Entsorgungskosten berücksichtigt werden. Somit ergibt sich folgende Formel für die Berechnung der LCC:

$$LCC = K_A + K_B + K_E. \quad (1)$$

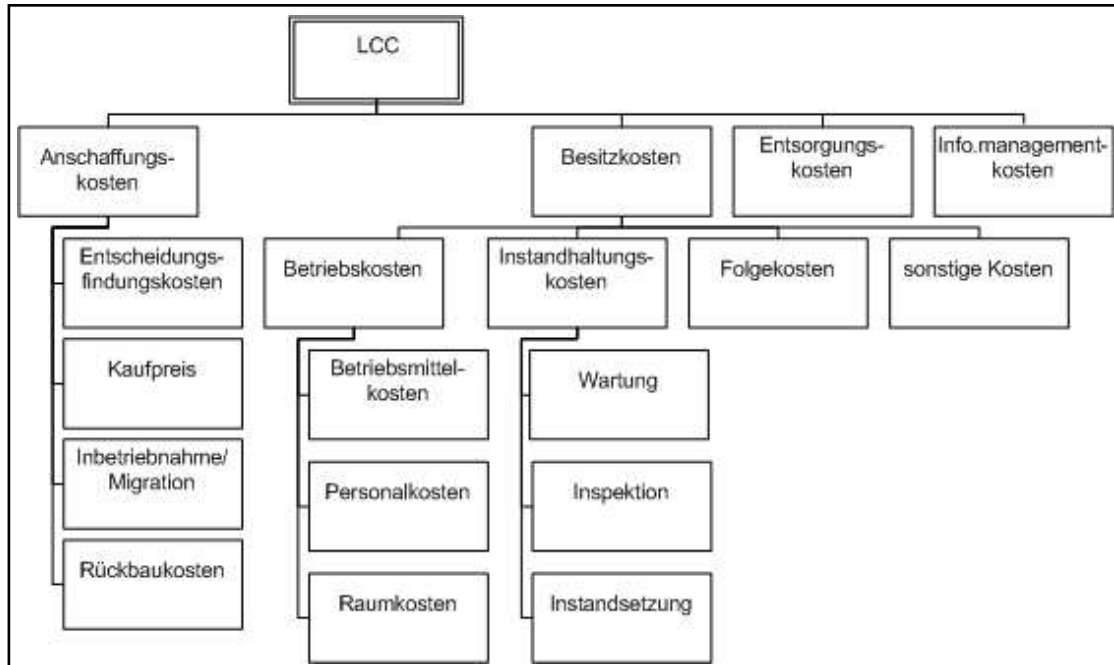
K_A ...Beschaffungskosten (Anschaffungskosten)

K_B ...Besitzkosten

K_E ...Entsorgungskosten

Gerade im Bereich der Eisenbahninfrastruktur bietet sich das Konzept der Lebenszykluskosten an. Somit werden nicht nur die Beschaffungskosten bei der Entscheidung berücksichtigt, sondern auch die nachfolgenden, wirtschaftlich kritischeren Kosten. Die Analyse der Lebenszykluskosten einer Eisenbahninfrastruktur ergab die folgende Aufstellung (vgl. Abbildung 10).

Abbildung 10: Lebenszykluskosten der Eisenbahninfrastruktur



Quelle: Vgl. Gutsche, K. (2010), S. 19; Schönemann, R. (2009), S. 19

Die Anschaffungskosten sind einmalig auftretende Kosten und können unmittelbar bewertet werden. Sie beinhalten den Kaufpreis, die Kosten für die Inbetriebnahme und Migration, Rückbaukosten sowie die Entscheidungsfindungskosten. Die Besitzkosten fallen über den gesamten Einsatzzeitraum an. Sie sind nicht direkt sichtbar und daher schwer zu bestimmen. Durch Rückgriff auf Erfahrungen mit ähnlichen Anlagen kann dieses Problem teilweise gelöst werden. Die Besitzkosten setzen sich aus den Betriebskosten, Instandhaltungskosten und sonstigen, regelmäßig auftretenden Kosten zusammen. Die Entsorgungskosten treten ebenso wie die Anschaffungskosten nur einmalig auf. Dabei kann es zur Stilllegung, Demontage oder zum Recycling kommen.⁴⁴

Im Folgenden wird das LCC-Modell für die Eisenbahninfrastruktur abgewandelt und für die Bewertung von LST, speziell ETCS, angepasst. Auf der Grundlage der obigen Darstellung (Abbildung 10) werden alle relevanten Komponenten der Lebenszykluskosten ermittelt.

Entscheidungsfindungskosten

Die Entscheidungsfindungskosten fallen während der Planung der Strecke an. Sie enthalten die Vorgänge, die die Entscheidung über die LST erleichtern sollen, z.B. Machbarkeitsstudien, Leistungsuntersuchungen und Anforderungsanalysen. Innerhalb dieser Phase werden Fragen bezüglich der LST geklärt, wie

„Welche LST ist am wirtschaftlichsten für die betrachtete Strecke?“ oder

„Welche LST entspricht den Anforderungen der EVU?“.

Da diese Kosten zunächst zur Auswahl der am besten geeigneten LST führen, kann angenommen werden, dass sie immer in der gleichen Höhe anfallen. Daher haben sie keinen Einfluss auf das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung und können somit bei den Berechnungen entfallen.

Kaufpreis

Der Kaufpreis der LST ergibt sich aus den jeweiligen Hardware- und Software-Komponenten. Zur Bestimmung der Kosten für die Hardware sind die Art und die Anzahl der einzelnen Elemente (Balisen, Loop, LEU, usw.) ausschlaggebend. Die Aufwendungen für die ETCS-Software ergeben sich hauptsächlich aus der Projektierung der Messages und Telegramme. Die Projektierung beinhaltet die Movement Authorities für die jeweiligen Blockabschnitte und Fahrstraßen, das Linking der Balisen, um den genauen Standort des Zuges und den Abstand zur nächsten Balise

⁴⁴ Deutsches Institut für Normung (2005), S. 8

zu übermitteln, und die Vorgänge im RBC.⁴⁵ Die Elemente werden von einem Signalbauunternehmen bezogen. Aus dem Aufwand für Forschung und Entwicklung sowie Fertigung bilden die Signalbauunternehmen den Preis der Komponenten.

Inbetriebnahme/Migration

Die Kosten der Inbetriebnahme und Migration ergeben sich hauptsächlich aus dem Planungs- und Genehmigungsverfahren für die Streckeninfrastruktur sowie der Bauausführung. Die damit verbundenen Aufgaben werden überwiegend an externe Dienstleister wie Signalbauunternehmen und Ingenieurbüros vergeben. Daher werden im Weiteren die Kosten der Inbetriebnahme und Migration als Fremdleistungen bezeichnet. Diese werden den Anschaffungskosten zugerechnet. Die Fremdleistungen werden in Projektierung und Bau unterteilt. Eine weitere Unterteilung in Personal- und Werkzeugkosten ist nicht erforderlich. Vom externen Dienstleister erhält das EIU eine Rechnung, deren Betrag es zu begleichen hat. Dieser geht als pauschaler Wert in die Berechnungen ein.

Rückbaukosten/Stilllegungskosten

Wird eine bereits vorhandene Strecke mit einer neuen LST ausgerüstet, so kann es vorkommen, dass die alte Technik nicht mehr erforderlich ist. Sie muss deshalb abgebaut oder stillgelegt werden. Da die Rückbau- bzw. Stilllegungskosten verschwindend gering sind, können sie vernachlässigt werden und gehen somit nicht in die weiteren Berechnungen ein.

Betriebsmittelkosten

Zu den Betriebsmittelkosten zählen die Kosten für Energie und den RBC-Betrieb. Die Energiekosten können aufgrund der Art und der Anzahl der Komponenten einer eingerichteten LST variieren. Es wird angenommen, dass während der Nutzungsdauer keine Veränderungen an der LST vorgenommen werden. Daher werden die Energiekosten als jährlich fester Betrag angegeben.

Aufgrund fehlender Informationen über das Betreibermodell des RBC wird angenommen, dass der RBC-Betrieb extern eingekauft wird. Der RBC-Betrieb verursacht sowohl Betriebskosten als auch Kosten für die Lizenz und die Instandhaltungsarbeiten. Das EIU und der externe Dienstleister vereinbaren dazu einen Vertrag. Es wird unterstellt, dass die Konditionen dieses Vertrages während der Nutzungsdauer nicht verändert werden. Der Rechnungsbetrag ist daher fix und fällt jährlich an.

⁴⁵ Vgl. Lackhove, C./Scheier, B. (2010), S. 4

Personalkosten

Während des Betriebes entstehen Kosten für das eingesetzte Personal. Die Mitarbeiter sind mit der Bedienung der Stellwerke beschäftigt. Für den Einsatz der ETCS-Technik muss die Strecke mit einem Relaisstellwerk oder einem elektronischen Stellwerk ausgestattet sein. In Zukunft sollen jedoch alle Strecken mit den elektronischen Stellwerken ausgerüstet werden. Daher wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass für jede ETCS-Ausrüstungsvariante die gleiche Stellwerksform verwendet wird. Unter dieser Voraussetzung kann angenommen werden, dass die Personalkosten nicht variieren. Sie haben somit keinen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen und bleiben bei den folgenden Berechnungen unberücksichtigt.

Raumkosten

Raumkosten fallen für Gebäude an, in denen der Betrieb der Strecke geregelt wird. Dies betrifft die Stellwerke und die technischen Einrichtungen des RBC. Wie bereits unter dem Punkt Personalkosten beschrieben, wird davon ausgegangen, dass die Stellwerksform jeder Ausrüstungsvariante identisch ist. Die technischen Einrichtungen des RBC werden ebenfalls in den Räumlichkeiten des Stellwerks untergebracht. Daher kann hier angenommen werden, dass die Raumkosten der einzelnen Alternativen identisch sind. Eine Berücksichtigung der Raumkosten bei den Wirtschaftlichkeitsberechnungen ist nicht erforderlich.

Instandhaltungskosten

Instandhaltungskosten setzen sich aus einem Personal- und einem Materialaufwand zusammen. Die DB Netz AG trennt ihre Kernkompetenzen klar in die Bereiche Instandhaltung und Instandsetzung des Fahrweges.⁴⁶ Diese werden von eigenständigen Geschäftsfeldern umgesetzt. Die Instandhaltung umfasst die Wartung, Inspektion und den kurzfristigen Austausch schadhafter Teile. Sie erfolgt bei der DB Netz AG nach der Konzernrichtlinie 892. Darin sind feste Zeiträume und Tätigkeiten beschrieben, nach denen die Instandhaltung durchzuführen ist. Daher sind die Kosten der Wartung und Inspektion im Voraus planbar. Sie können jährlich abgerechnet werden.

Die Instandsetzung hingegen dient der Beseitigung von Fehlern und Mängeln. Das Geschäftsfeld Instandsetzung der DB Netz AG ist mit der Auftragssteuerung und Arbeitsvorbereitung betraut. Der überwiegende Teil der Instandsetzungsarbeiten wird nach erfolgter Planung am Markt ausgeschrieben und als Fremdleistungen

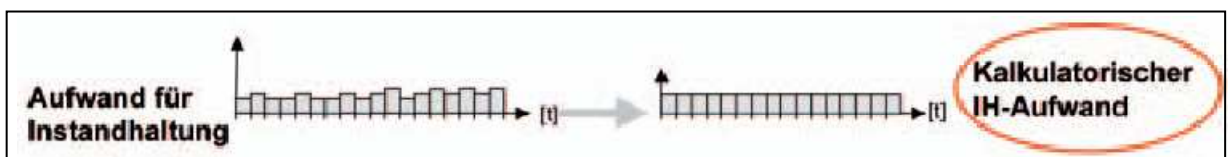
⁴⁶ Vgl. Scherz, W./Kabisch, J. (2004), S. 62

eingekauft. Erste Ansprechpartner der DB Netz Instandsetzung sind konzerninterne Dienstleister. Sind die Aufgaben aus finanziellen, maschinellen oder personellen Kapazitätsgründen nicht intern durchführbar, werden die Angebote konzernexterner Unternehmen herangezogen.⁴⁷ Der Rechnungsbetrag geht als pauschaler Wert in die Berechnungen ein. In der Praxis wird davon ausgegangen, dass die Kosten der Instandsetzung ca. 10 % der Instandhaltungskosten ausmachen.⁴⁸

In der Regel werden die Instandhaltungskosten jährlich variieren und „tendenziell [...] zum Ende der Lebensdauer hin zunehmen“⁴⁹. Ein EIU besitzt zumeist sehr viele gleichartige Anlagen, die sich in unterschiedlichen Alterungszuständen befinden. Daher kann angenommen werden, „...“, dass die Anlagen bei rationalem Instandhaltungs- und Investitionsverhalten ein durchschnittliches Alter besitzen, was nahe am Mittelwert liegt“⁵⁰.

Aufgrund dieser Annahmen kann ein kalkulatorischer Instandhaltungsaufwand zur Berechnung herangezogen werden. Dieser hat über die Nutzungszeit einen jährlich festen Betrag (vgl. Abbildung 11).⁵¹

Abbildung 11: Kalkulatorischer Instandhaltungsaufwand



Quelle: Lienau, C./Siefer, T. (2007), S. 800

Folgekosten

Folgekosten sind Kosten, die durch Ausfälle oder Imageverluste entstehen. Aber auch Vertragsstrafen (Pönalen) fallen unter den Begriff der Folgekosten. Sie führen meist zur Schmälerung der Einnahmen und müssen als Aufwand berücksichtigt werden. Innerhalb des Anwendungsbeispiels werden jedoch keine Betriebsstörungen einbezogen. Daher werden die Folgekosten in den Berechnungen keine Berücksichtigung finden. In der betrieblichen Praxis ist es dennoch ratsam die erlösschmälernden Aufwendungen zu ermitteln. Sie können sich negativ auf das langfristige Unternehmensziel, die Bereitstellung einer sicheren und leistungsfähigen Infrastruktur, auswirken.

⁴⁷ Vgl. Scherz, W./Kabisch, J. (2004), S. 68

⁴⁸ Gespräch vom 12.04.2010

⁴⁹ Lienau, C./Siefer, T. (2007), S. 800

⁵⁰ ebenda

⁵¹ Vgl. Lienau, C./Siefers, T. (2007), S. 800

Sonstige Kosten

Weitere Kosten während des Besitzes der Anlagen ergeben sich für Versicherungen, Kapitalkosten und Steuern. Aufgrund eines politischen Beschlusses wurde ETCS mit dem höchsten Sicherheitsstandards entwickelt. Je höher die Sicherheit, umso geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass Schäden und Unfälle während des Betriebes auftreten. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Versicherungskosten für ETCS-Ausrüstungsvarianten eher geringer ausfallen als die Kosten, die bisher für die angewandte Technik aufgewendet werden mussten.

Dennoch ist es schwierig diese Kostenbestandteile zu bestimmen. Sie sind stark von den zukünftigen Marktentwicklungen abhängig. In der vorliegenden Arbeit bleiben sie daher unberücksichtigt und fließen nicht in die Berechnungen ein.

Entsorgungskosten

Unter dem Begriff Entsorgungskosten fallen alle Aufwendungen, die mit der Stilllegung, Demontage und dem Recycling von Bahnanlagen verbunden sind. Im Lebenszyklus-Modell der Eisenbahninfrastruktur spielen sie eher eine untergeordnete Rolle. Aufgrund der langen Lebensdauer der Anlagen ist der Einfluss der Entsorgungskosten auf das Gesamtergebnis vernachlässigbar. Weiterhin beruhen die Kostenangaben häufig auf groben Schätzungen, da nicht ausreichend Informationen vorhanden sind.⁵² In den weiteren Ausführungen werden die Entsorgungskosten folglich nicht berücksichtigt.

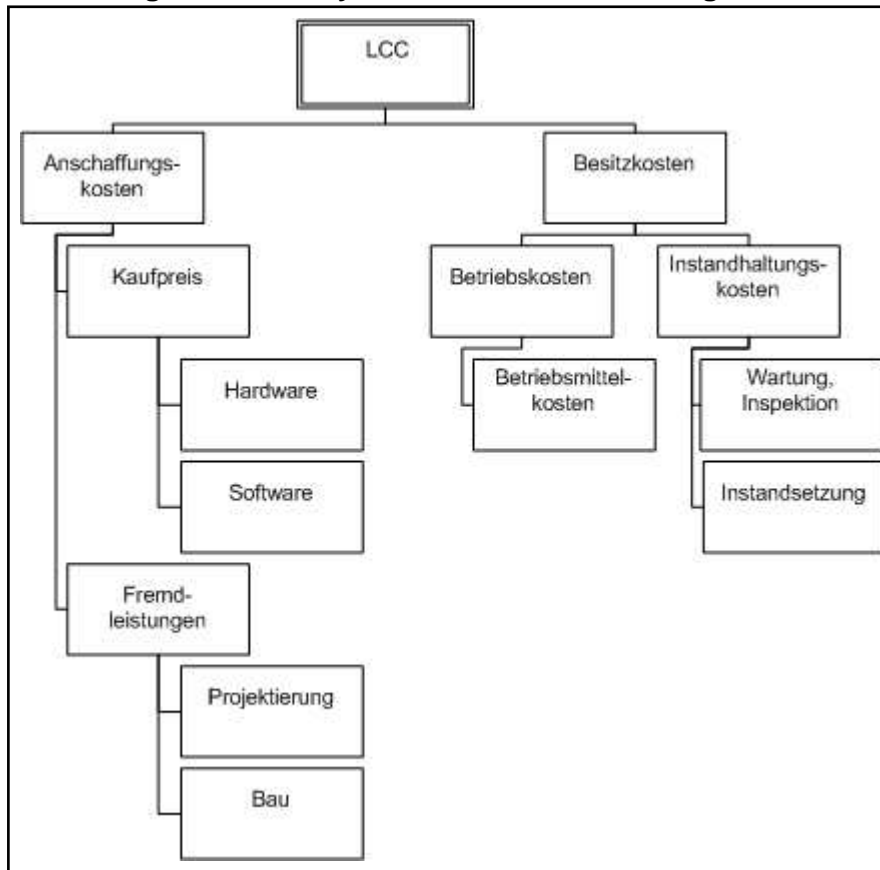
Informationsmanagementkosten

Informationsmanagementkosten entstehen durch die Planung, Verwaltung und Kontrolle von wichtigen Informationen sowie die Gewährleistung einer reibungslosen Kommunikation innerhalb des EIU. Sie sind nicht entscheidungsrelevant, da sie bei jeder Maßnahme auftreten. Diese Kostenbestandteile bleiben daher bei der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung unberücksichtigt.

Die Betrachtung der LCC mit Fokus auf die wirtschaftliche Bewertung von ETCS hat ergeben, dass einige Kostenbestandteile vernachlässigbar sind. Andere jedoch haben einen großen Einfluss auf das Gesamtergebnis. Diese müssen im Anwendungsbeispiel zahlenmäßig bestimmt werden. Die folgende Abbildung zeigt alle relevanten Bestandteile, die in die Bewertung der Lebenszykluskosten von ETCS-Ausrüstungsvarianten einfließen.

⁵² Vgl. Gutsche, K. (2010), S. 27

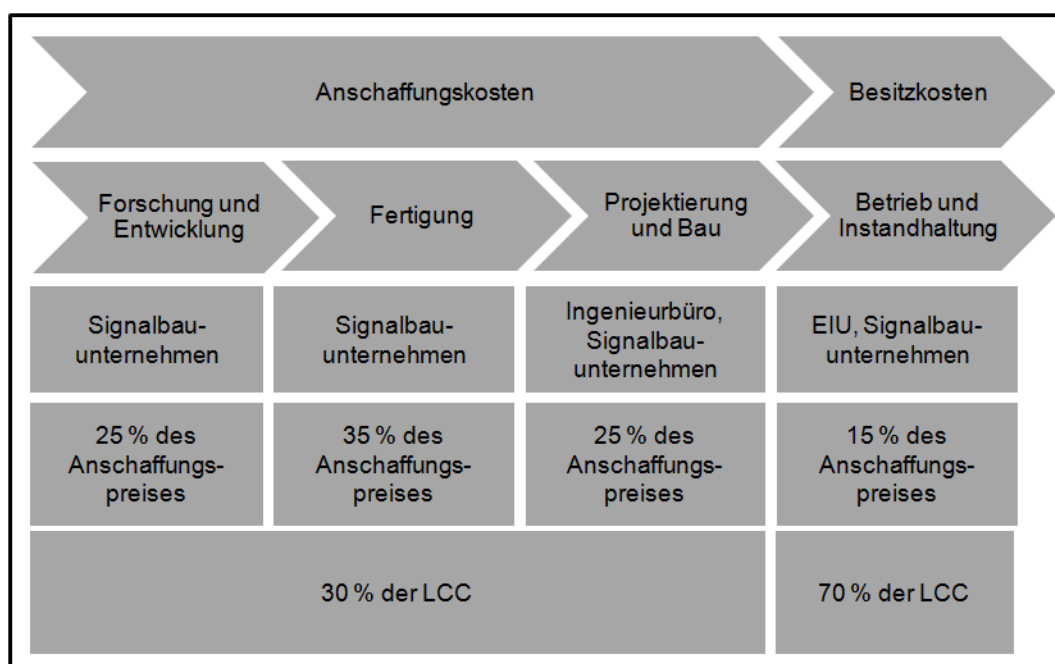
Abbildung 12: Lebenszykluskosten zur Bewertung von ETCS



Quelle: eigene Darstellung

In Anlehnung an Bormet kann angenommen werden, dass sich die Lebenszykluskosten wie folgt verteilen:

Abbildung 13: Verteilung der Lebenszykluskosten



Quelle: Vgl. Bormet (2007), S. 14; eigene Darstellung

Ca. 30 % der Lebenszykluskosten entstehen in der Anschaffungsphase. Der Kaufpreis der LST setzt sich aus verschiedenen Bestandteilen zusammen. Zum einen besteht er aus den Kosten für die einzelnen bautechnischen Elemente (Balisen, LEU, usw.). Diese beinhalten Forschungs- und Entwicklungskosten zu 25 % und Fertigungskosten zu 35 %. Zum anderen entstehen Kosten für die Projektierung und den Bau der LST. Sie gehen zu 25 % in den Anschaffungspreis ein. Ein weiterer Teil des Anschaffungspreises (15 %) lässt sich dem Betrieb und der Instandhaltung zuordnen und wird demzufolge in der Anschaffungsphase nicht berücksichtigt. Daraus ergibt sich, dass 85 % des Anschaffungspreises der Anschaffungsphase zuzurechnen sind und somit die Anschaffungskosten bilden. Diese machen 30 % der LCC aus. Während der Besitzphase der LST entstehen weitere 70 % der Lebenszykluskosten für Betrieb und Instandhaltung.

Das Schema (vgl. Abbildung 13) macht nochmals deutlich, dass der größte Teil der LCC erst während des Betriebes der LST zustande kommt. Daher ist es besonders wichtig, die Gesamt-LCC zu bestimmen. Sie haben eine große Bedeutung bei der Bewertung der Wirtschaftlichkeit verschiedener Zugbeeinflussungssysteme.

3.3 Monetär erzielbarer Nutzen

Das Vorhalten einer Eisenbahninfrastruktur ist mit hohen Kosten verbunden. Eisenbahninfrastrukturunternehmen müssen die Kosten der Unterhaltung und der Instandhaltung der Schienenwege tragen. Zur Deckung der Ausgaben muss ein geeignetes Preismodell für die Fahrwegnutzung eingesetzt werden. Weiterhin können Fördermittel der Bundesrepublik Deutschland und der Europäischen Union zur Finanzierung beitragen. Je nach Vorhaben gibt es unterschiedliche Förderprogramme, die von einem EIU in Anspruch genommen werden können. Die Europäische Union unterstützt unter anderem Vorhaben, die die Interoperabilität der Schieneninfrastruktur zum Ziel haben. Auch ETCS ermöglicht einen grenzüberschreitenden Verkehr ohne dass das Fahrzeug mit unterschiedlichen Systemen ausgestattet werden muss. Im Rahmen dieser Arbeit ist es jedoch nicht möglich geeignete Förderprogramme auszuwählen sowie deren Förderhöhe zu bestimmen. Solche Subventionen werden daher nicht berücksichtigt. Dennoch wird darauf hingewiesen, dass staatliche Förderungen durchaus üblich sind und das Ergebnis positiv beeinflussen können.

In der Diplomarbeit wird davon ausgegangen, dass ein EIU die Kosten einer Eisenbahninfrastruktur vollständig durch eigene Mittel zu tragen hat. Zur Deckung der Kosten werden von einem EIU Erlöse aus dem Verkauf von bereitgestellten Trassen erwirtschaftet. Diese Einnahmen werden bei der DB Netz AG durch das Trassenpreissystem realisiert.

Kann ein Zug die Infrastruktur nutzen, ohne dabei einen nachfolgenden Zug zu behindern oder auf einen vorausfahrenden Zug aufzulaufen, so wird diese Möglichkeit als Trasse bezeichnet. Das EIU stellt dem EVU Fahrwegkapazität, also Trassen, zu einer bestimmten Zeit zur Verfügung. Mit Hilfe des Trassenpreissystems der DB Netz AG kann das Trassenentgelt je Trassenkilometer bestimmt werden. Dabei werden drei Komponenten berücksichtigt.

Nutzenabhängige Komponente

Zu dieser Komponente zählen die Streckenkategorie und das Trassenprodukt. Die Strecken der DB Netz AG werden in 12 Kategorien unterschieden. Anhand verschiedener Streckenmerkmale, wie z.B. der Geschwindigkeit oder der Betriebsart, erfolgt eine Preisdifferenzierung. Aber auch Ausstattungselemente der Infrastruktur und die verkehrliche Bedeutung der Strecke werden berücksichtigt.⁵³ „Aus der Streckenkategorie leitet sich der Grundpreis je Trassenkilometer ab.“⁵⁴ Das Trassenprodukt ermöglicht eine weitere Differenzierung anhand der Anforderungen des Kunden, d.h. der EVU. Es besteht eine grundlegende Unterscheidung nach Art des Verkehrs in Personen- und Güterverkehr. Weiterhin werden der Personenverkehr in fünf und der Güterverkehr in vier Trassenprodukte eingeteilt. Mit Hilfe des sogenannten Trassenproduktfaktors ist es möglich diese Unterscheidungen im Trassenpreis zu berücksichtigen. Er wird durch Multiplikation mit dem Grundpreis eingerechnet.

Leistungsabhängige Komponente

Dabei werden ein Anreizsystem zur Verringerung von Störungen und ein Anreizsystem zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit berücksichtigt. Das Anreizsystem zur Verringerung von Störungen soll eine entgeltliche Anregung schaffen, die Störungen auf den Schienenwegen zu reduzieren. Ziel ist es die Jahrespünktlichkeitswerte einzuhalten oder gar zu übertreffen. Je nachdem wird ein Anreizentgelt in Höhe von +/- 10 Cent pro zusätzlicher Verspätungsminute angerechnet.⁵⁵ Da in

⁵³ Vgl. DB Netz AG (2009), S. 4 f.

⁵⁴ DB Netz AG (2009), S. 4

⁵⁵ Vgl. DB Netz AG (2009), S.8

dem folgenden Anwendungsbeispiel keine Verspätungen berücksichtigt wurden, kann dieser Bestandteil bei den Berechnungen entfallen. Im Anreizsystem zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit wird zum einen die Auslastung der Strecke bewertet. Ein multiplikativer Faktor wird bei besonders stark ausgelasteten Streckenabschnitten in die Berechnungen einbezogen. Dies soll eine effizientere Nutzung der Infrastruktur gewährleisten. Zum anderen kann ein Zuschlag im Falle einer zugbedingten Abweichung von der Mindestgeschwindigkeit einbezogen werden.⁵⁶ Die Inhalte dieser leistungsfähigen Komponente können in der Berechnung der Trassenentgelte nicht berücksichtigt werden. Die im Anwendungsbeispiel verwendete Strecke ist nur fiktiver Art. Daher können die erforderlichen Informationen nicht bestimmt werden. Außerdem soll die Bewertung möglichst allgemeingültig sein und sich nicht auf einen ganz speziellen Streckenfall beziehen.

Sonstige Komponenten

Weiterhin kann in das Trassenentgelt ein Regionalfaktor einfließen. Er dient der Förderung der Strecken im regionalen Schienennetz. „Die Regionalfaktoren wurden örtlich differenziert für das jeweilige Regionalnetz gebildet.“⁵⁷ Im Anwendungsbeispiel dieser Arbeit wird von einer fiktiven Strecke ausgegangen, die aufgrund ihres Profils nicht einer typischen Regionalstrecke entspricht. Daher wird der Regionalfaktor als „1“ angenommen. Für schwere Züge (> 3000 t), die zu einem erhöhten Verschleiß und Kapazitätsverbrauch führen, wird eine Lastkomponente erhoben. Im Anwendungsbeispiel wird angenommen, dass kein Zug die Gewichtsbeschränkung übersteigt. Der additive Zuschlag muss daher nicht erhoben werden.

Die genannten Komponenten sind Grundlage zur Bildung des Trassenpreises. Daraus ergibt sich folgende Berechnungsformel.

$$TE = G * P * R * Z * l \quad (3)$$

TE...Trassenpreiseinnahmen

G...Grundpreis aus der Streckenkategorie

P...Trassenprodukt

R...Regionalfaktor; R = 1

Z...Anzahl der Züge

l... Streckenlänge

⁵⁶ Vgl. DB Netz AG (2009), S. 8

⁵⁷ DB Netz AG (2009), S. 9

3.4 Zusammenführung der monetären Faktoren

Alle für die Wirtschaftlichkeitsbewertung relevanten monetären Kosten- und Nutzenbestandteile wurden ermittelt und beschrieben. In diesem Kapitel gilt es nun eine geeignete Berechnungsmethode zu finden, um die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen ETCS-Ausrüstungsstufen abzubilden. Da es sich um ein Entscheidungsproblem handelt, bei dem differenzierende Alternativen miteinander verglichen und die bestmögliche Variante ausgewählt werden soll, sind die Investitionsrechnungsverfahren gut geeignet. Sie unterscheiden sich in statische und dynamische Verfahren.

Die statischen Investitionsrechnungsverfahren sind für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit verschiedener LST weniger vorteilhaft. Eine Abbildung der Ein- und Auszahlungen über mehrere Perioden ist nicht möglich, da der tatsächliche Zeitpunkt des Zahlungsanfalls nicht berücksichtigt wird.⁵⁸ Aufgrund der langen Nutzungsdauer im System Bahn von ca. 20 Jahren sollte von einer solchen Vereinfachung Abstand genommen werden.

Bei den weiteren Betrachtungen werden daher lediglich die dynamischen Investitionsrechnungsverfahren berücksichtigt. Die Ein- und Auszahlungen werden über die gesamte Nutzungsdauer der Investitionsalternative erfasst. Durch Auf- oder Abzinsen der Zahlungsströme auf einen gemeinsamen Zeitpunkt sind die verschiedenen Alternativen vergleichbar. Zu den dynamischen Investitionsrechnungsverfahren zählen die Kapitalwertmethode, die interne Zinsfußmethode und die Annuitätenmethode.⁵⁹

Bei der Methode des internen Zinsfußes wird die Verzinsung des gebundenen Kapitals bestimmt. Es wird ein Zinssatz gesucht, für den sich ein Kapitalwert von null ergibt. Die sich ergebende mathematische Formel ist eine Gleichung n-ten Grades. Da sich während der Nutzungsdauer Einzahlungs- und Auszahlungsüberschüsse ergeben, kann diese Gleichung n-ten Grades mehrere, eine oder keine Lösung besitzen.⁶⁰ Demzufolge kann diese Methode als Entscheidungsgrundlage kein eindeutiges Ergebnis liefern. Sie wird in dieser Arbeit als Investitionsrechnungsverfahren keine Anwendung finden.

⁵⁸ Vgl. Perridon, L./Steiner, M. (2004), S. 40

⁵⁹ Vgl. Perridon, L./Steiner, M. (2004), S. 38

⁶⁰ Vgl. Perridon, L./Steiner, M. (2004), S. 65 f.

Zur Auswahl bleiben somit die Kapitalwertmethode und die Annuitätenmethode als Alternativen der dynamischen Investitionsrechnung. Wie der Name der Methode besagt, wird bei der Kapitalwertmethode durch Diskontierung der Zahlungsreihen auf einen einheitlich gewählten Zeitpunkt ein Kapitalwert bestimmt. Die Annuitätenmethode ermittelt einen Betrag, der neben der Tilgung und der Verzinsung in jeder Periode zusätzlich zur Verfügung steht. Die beiden Methoden führen unter der Voraussetzung einer gleichen Nutzungsdauer aller Alternativen und eines unbeschränkten, vollkommenen Kapitalmarktes zum selben Ergebnis.⁶¹ Die Auswahl zwischen den, unter diesen Bedingungen, vollkommen äquivalenten Methoden ist völlig frei. Da die Kapitalwertmethode in der Praxis am häufigsten Anwendung findet, wird sie im Rahmen dieser Arbeit zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit verschiedener Investitionsalternativen eingesetzt.⁶²

Die Kapitalwertmethode ist als Entscheidungshilfe besonders gut geeignet, weil sie den Vergleich verschiedener Alternativen ermöglicht. Der Kapitalwert stellt den Wert einer Investition zum aktuellen Zeitpunkt dar. Alle Bestandteile einer Investition werden in Form von Zahlungsströmen auf einen Zeitpunkt konzentriert. Für jede Periode wird die Differenz der Einzahlungen e_t und der Auszahlungen a_t gebildet. Der sich ergebende Zahlungsstrom wird mit einem Kalkulationszinssatz i auf den Zeitpunkt $t = 0$ abgezinst. Die Summe aller diskontierten Investitionszahlungen ergibt den Kapitalwert C_0 der Alternative (vgl. Formel 4).

$$C_0 = -K_A + \sum_{t=0}^n (e_t - a_t) * \frac{1}{(1+i)^t} \quad (4)$$

Aus der Formel geht hervor, dass alle während der Nutzungsdauer anfallenden Ein- und Auszahlungen berücksichtigt werden. Auch die Anschaffungsauszahlung einer Investition K_A zum Zeitpunkt $t = 0$ geht in die Berechnungen mit ein. Mit Hilfe des Diskontierungsfaktors $q_t = (1+i)^t$ werden die Barwerte der Zahlungsströme zum Zeitpunkt $t = 0$ bestimmt. Dieser Zeitpunkt zeigt den Beginn einer Investition an. Im Gegensatz dazu stellt der Zeitpunkt $t = n$ das Ende des Betrachtungszeitraums dar.⁶³

⁶¹ Vgl. Kruschwitz, L. (2007), S. 111

⁶² Vgl. Müller, D. (2006), S. 232

⁶³ Vgl. Perridon, L./Steiner, M. (2004), S. 61 ff.

Der Kalkulationszinssatz i gibt eine zu erwartende Mindestverzinsung des einzusetzenden Kapitals an. Dabei handelt es sich um einen Zinssatz, den der Investor erhalten würde, wenn der Investitionsbetrag am Markt angelegt werden würde. Er schafft einen Zeitausgleich und stellt somit die Verbindung zwischen den einzelnen Zahlungsströmen her. Als Bemessungsgrundlage muss der Kalkulationszinssatz vor den Berechnungen festgelegt werden.⁶⁴

Anhand des berechneten Kapitalwertes kann die Vorteilhaftigkeit einer Investitionsalternative bestimmt werden. Die absolute Vorteilhaftigkeit einer Investition ist dann gegeben, wenn der Kapitalwert nicht negativ ausfällt. Für den Vergleich mehrerer sich ausschließender Szenarien wird die relative Vorteilhaftigkeit definiert. Diese besagt, dass zwischen konkurrierenden Szenarien diejenige als vorteilhaft bezeichnet wird, die den größten positiven Kapitalwert ausweist.⁶⁵

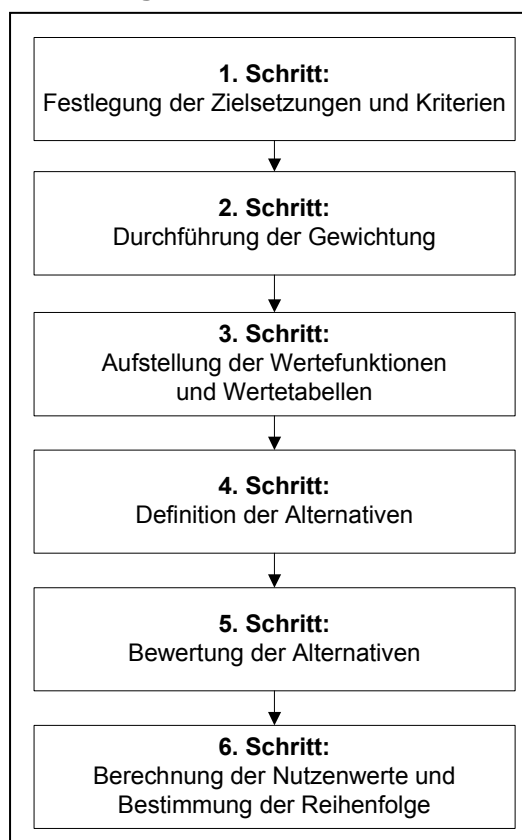
⁶⁴ Vgl. o.V. (2010a)

⁶⁵ Vgl. Müller, C. (2005)

3.5 Nutzwertanalyse

Neben den monetären Faktoren sind auch Kriterien von großer Bedeutung, die nicht bzw. nicht ausreichend monetär bewertbar sind. Diese Kriterien finden mit Hilfe der Nutzwertanalyse Berücksichtigung. Die Nutzwertanalyse dient als Entscheidungshilfe zwischen verschiedenen Alternativen. Dabei erfolgt eine Auswahl und Bewertung verschiedener Kriterien aus Sicht des Entscheiders. Innerhalb dieser Arbeit steht die LST im Mittelpunkt. Die Entscheidung, welche Alternative gewählt wird, obliegt in diesem Fall dem EIU.⁶⁶ In welcher Art und Weise eine Nutzwertanalyse durchzuführen ist, wird im Folgenden erläutert (vgl. Abbildung 14).

Abbildung 14: Ablauf einer Nutzwertanalyse



Quelle: Vgl. Rinza, P./Schmitz, H. (1992), S. 39

Am Anfang einer Nutzwertanalyse werden konkrete Ziele festgelegt, zu deren Erreichung die Investitionsalternativen beitragen. Aus diesen konkreten Zielsetzungen lassen sich Kriterien ableiten, nach denen die Alternativen zu bewerten sind. Bei der Aufstellung der Kriterien müssen folgende Forderungen berücksichtigt werden:

- Angemessenheit
- Systematik
- Unabhängigkeit

⁶⁶ Vgl. Rinza, P./Schmitz, H. (1992), S. 36

Zur Durchführung der Nutzwertanalyse sollte eine Auswahl der Faktoren getroffen werden. Es ist nicht immer sinnvoll alle gefundenen Kriterien in die Bewertung einfließen zu lassen. Je nach Umfang der Entscheidung sollte die Anzahl der verwendeten Kriterien angemessen gewählt werden. Weiterhin ist es wichtig eine gewisse Systematik beizubehalten. Daher sollten reine Kostenkriterien innerhalb der Nutzwertanalyse ausgeschlossen werden. Sind sie für die Betrachtung dennoch von Bedeutung, sollten sie angemessen formuliert und für die Bewertung angepasst werden. Außerdem müssen die Kriterien unabhängig voneinander sein. Das bedeutet, dass sich zwei Kriterien nicht auf dieselben Eigenschaften beziehen dürfen. Eine Doppelbewertung oder Überschneidungen innerhalb der Kriterien müssen ausgeschlossen werden.⁶⁷ Mögliche Kriterien für die Bewertung des nicht monetären Nutzens einer LST im Bahnbetrieb sind z.B.:

- Sicherheit
- Verfügbarkeit
- Leistungsfähigkeit
- Verspätungen
- Wartungsaufwand
- Überhol- und Kreuzungsvorgänge
- bauliche Veränderungen/Flexibilität.

In einem weiteren Schritt wird eine Gewichtung der Kriterien durchgeführt. Mit Hilfe des Matrixverfahrens können die einzelnen Gewichte ermittelt werden. Dabei erfolgt ein paarweiser Vergleich der Kriterien. Anhand von Punktwerten wird die Bedeutung der Kriterien zueinander ausgedrückt. Die ermittelten Gewichtungsfaktoren werden in Form von Prozentsätzen dargestellt und geben an, wie stark die Ergebnisgrößen in den Gesamtnutzwert einfließen. Die Summe der Gewichtungsfaktoren muss 100 % ergeben. Eine Gewichtung der Kriterien sollte immer von Experten durchgeführt werden.⁶⁸

Um den Erfüllungsgrad der Kriterien zu ermitteln, werden Wertefunktionen und Wertetabellen aufgestellt. Die Kriterien weisen unterschiedliche Dimensionen auf und können in quantitative und qualitative Faktoren differenziert werden. Sind die Ausprägungen messbar, d.h. quantitativ bewertbar, können die Kriterien mit Hilfe von Wertefunktionen beschrieben werden. Dabei sind alle mathematischen Funktionen anwendbar. In der Praxis werden häufig lineare Funktionen verwendet, um das Ver-

⁶⁷ Vgl. Rinza, P./Schmitz, H. (1992), S. 43 ff.

⁶⁸ Vgl. Rinza, P./Schmitz, H. (1992), S. 49

fahren überschaubarer zu gestalten. Sind die Kriterien nicht quantifizierbar, sondern können lediglich durch eine qualitative Beschreibung bewertet werden, kommen Wertetabellen zum Einsatz. Einer Punktwertskala werden die unterschiedlichen Ausprägungen wörtlich zugeordnet. Wertetabellen eignen sich besonders für Ja-/Nein-Entscheidungen. Der niedrigste Erfüllungsgrad besagt dabei, dass die nicht vorhandene Eigenschaft keinen Nutzen für die Alternative bringt. Ist die Eigenschaft jedoch vorhanden, so wird sie mit dem maximalen Erfüllungsgrad bewertet. Besitzt ein Kriterium mehrere Ausprägungen, ist es dennoch möglich Wertetabellen zu deren Beurteilung einzusetzen.⁶⁹

Zur Skalierung der Wertefunktionen und -tabellen innerhalb der Nutzwertanalyse ist eine Kardinalskala gut geeignet. Sie wird in der Praxis am häufigsten angewendet, so dass sie auch in dieser Arbeit Berücksichtigung findet. Die Kardinalskala ordnet den Erfüllungsgraden absolute Werte zu. Die Skalenlänge ist dabei beliebig. Praktisch sind jedoch Werte zwischen null und zehn, so dass die Bewertung nicht zu grob, aber auch nicht zu fein wird. Zur Bewertung sollte immer die gleiche Skalenlänge verwendet werden. Das ermöglicht es, später einen genauen Zielerfüllungsgrad für jedes Kriterium in Form einer Prozentzahl zu bestimmen.⁷⁰

Anschließend werden die Alternativen definiert, die der Nutzwertanalyse unterzogen werden sollen. Dies geschieht bewusst erst nach den ersten drei Schritten. So wird sichergestellt, dass die bisher gemachten Überlegungen nicht zugunsten einer Alternative beeinflusst werden. Für die zu bewertenden Alternativen können nun die Erfüllungsgrade festgelegt werden. Die Bewertung erfolgt anhand der Wertefunktionen und -tabellen und sollte von Experten durchgeführt werden. Zur Bestimmung der Nutzwertbeiträge werden der Erfüllungsgrad und die jeweilige Gewichtung der einzelnen Kriterien multipliziert. Der Gesamtnutzen einer Alternative ergibt sich aus der Summe der zugehörigen Nutzwertbeiträge. Die Ergebnisse der Nutzwertanalyse können dann in eine Rangfolge gebracht und mit geeigneten Methoden dargestellt werden.⁷¹

⁶⁹ Vgl. Rinza, P./Schmitz, H. (1992), S. 69, 75 ff.

⁷⁰ Vgl. Rinza, P./Schmitz, H. (1992), S. 71 f.

⁷¹ Vgl. Rinza, P./Schmitz, H. (1992), S. 98 f.

4 Methoden zur Bestimmung eines Zielwertes der Lebenszykluskosten

4.1 Allgemeines

Die vorausgehenden Überlegungen haben aufgezeigt, welche Kostenbestandteile die Lebenszykluskosten einer Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik beeinflussen. In diesem Abschnitt gilt es, ein geeignetes Verfahren aufzudecken, das es ermöglicht, einen Zielwert für die Lebenszykluskosten der LST zu bestimmen. Dabei muss die vorhandene Datenbasis berücksichtigt werden. Im Folgenden werden drei Verfahren vorgestellt:

- eine Analyse mittels Äquivalenzziffern,
- eine angepasste Conjoint Analyse,
- eine Bestimmung anhand konkreter Kostenwerte.

4.2 Analyse mittels Äquivalenzziffern

Der Grundgedanke dieses Verfahrens liegt in der Komplexität eines Bauteils bzw. Prozesses. Unter Komplexität wird die Gesamtheit aller Merkmale und Eigenschaften, die ein Produkt bzw. Prozess in sich vereint, verstanden.⁷² Jedes Bauteil und jeder Prozess weist eine gewisse Komplexität auf, die sich in ihrer Ausprägung unterscheidet. Aufgrund dieser Tatsache ist ein Vergleich der Bauteile und Prozesse mit einer Referenz durchführbar. Die Zuordnung von Äquivalenzziffern ermöglicht eine direkte Gegenüberstellung.

Äquivalenzziffern sind Umrechnungszahlen. Sie geben ein Verhältnis der Kosten eines Produktes oder Prozesses zu den Kosten eines Referenzproduktes bzw. -prozesses an.⁷³ Daher eignet sich diese Methode gut zur Bestimmung der fehlenden Kostengrößen und zur Kalkulation eines Zielwertes der LCC.

In Anlehnung an die Komplexitäts-Index-Analyse kann dieses Verfahren wie folgt durchgeführt werden.⁷⁴ Zunächst sollten alle für die jeweiligen Investitionsalternativen relevanten Bauteile und Prozesse bestimmt werden. Eine detaillierte Beschreibung dieser Bauteile und Prozesse ermöglicht es, später die Komplexität genauer

⁷² Vgl. o.V. (o.J.b)

⁷³ Vgl. o.V. (2010)

⁷⁴ Vgl. Kaufmann, L. (1996), S. 212 - 221

4 Methoden zur Bestimmung eines Zielwertes der Lebenszykluskosten

festzustellen und eine exakte Zuordnung der Äquivalenzziffern vorzunehmen. Die Darstellung der einzelnen Bauteile sollte z.B. Informationen zur Anzahl der Einzelkomponenten, dem inneren Aufbau sowie den Fähigkeiten und Funktionen enthalten. Die Analyse der Prozesse baut auf die Beschreibung der Bauteile auf. Die Kenntnis über die Kompliziertheit eines Bauteils lässt Rückschlüsse über den Aufwand diverser Prozesse zu. Weiterhin sollten z.B. der Ressourcenverbrauch (Material, Personal, Zeit) bewertet und die Einzelaktivitäten bestimmt werden. Je nach Bauteil und Prozess können weitere Angaben interessant sein, die in der Analyse berücksichtigt werden sollten.

In einem weiteren Schritt werden ein Referenzbauteil und ein Referenzprozess ausgewählt, die eindeutig definiert werden konnten und für die genaue Kostenwerte vorhanden sind. Dieser Referenz wird die Äquivalenzziffer „1“ zugeordnet. Die Komplexität dieses Einheitsbauteils bzw. Einheitsprozesses verursacht Kosten, die mit 100 % bewertet werden. Alle anderen Bauteile, für die ein Kostenwert zu bestimmen ist, werden mit dem Referenzbauteil im Bezug auf die Komplexität verglichen. Ihnen wird eine Äquivalenzziffer zugeordnet. Auch die Prozesse werden gegenüber dem Referenzprozess positioniert.

Anhand der Äquivalenzziffern und der Kostenwerte der Referenz können nun die Kosten der einzelnen Bauteile und Prozesse bestimmt werden. Ein Zielwert für die LCC ergibt sich aus der Summe aller einer Investitionsalternative zugehörigen Kostengrößen. Die Analyse der Bauteile und Prozesse sowie die Zuordnung der Äquivalenzziffern sind immer abhängig vom Betrachter. Daher sollte dieses Verfahren nur von Experten durchgeführt werden. Sinnvoll erscheint es, das Wissen und die Vorstellungen mehrerer Fachleute einzubeziehen, um somit alle relevanten Informationen zu berücksichtigen. In der Tabelle 1 wird die Anwendung der Äquivalenzziffern-Methode beispielhaft dargestellt.

Tabelle 1: Beispielhafte Anwendung der Äquivalenzziffern

Bauteil		Äquivalenz in %	Kosten
Bauteil R	Referenz	100	1.200,00 €
Bauteil A		100	1.200,00 €
Bauteil B		125	1.500,00 €
Bauteil C		90	1.080,00 €
Bauteil D		200	2.400,00 €

Quelle: eigene Darstellung

4.3 Angepasste Conjoint Analyse

Grundsätzlich handelt es sich bei der Conjoint Analyse um eine Methode im Target Costing. Mit ihrer Hilfe werden die Präferenzen und Vorstellungen der Kunden analysiert und deren Kaufabsichten prognostiziert.⁷⁵ Dabei kann auch die Preisbereitschaft der Kunden berücksichtigt werden. Aus dieser Erkenntnis lässt sich ermitteln, um wie viele Geldeinheiten ein Produkt mehr als ein Referenzprodukt kosten darf.⁷⁶ Um dieses Verfahren in Bezug auf die LST anwenden zu können, wird es abgewandelt und an die entsprechenden Umstände angepasst. Die Beurteilung der Investitionsalternativen soll in dieser Arbeit nicht von den potentiellen Kunden, den EVU, durchgeführt werden. Diese Aufgabe obliegt den Besitzern der Eisenbahninfrastruktur, den EIU. Daher muss das Verfahren so gestaltet werden, dass ein EIU die Bewertung selbst vornehmen kann.

Im Zuge dieser Untersuchung ist ein EIU nicht an einer Feststellung der Preisbereitschaft seiner Kunden interessiert. Vielmehr möchte es herausfinden, was eine Investitionsalternative gegenüber einer Referenzalternative mehr bzw. weniger kosten darf. Um dies zu ermitteln, wird auf die Leistungsfähigkeit zurückgegriffen. Die Leistungsfähigkeit ist maßgebend für die erzielbaren Trassenpreiseinnahmen. Aus der Leistungsfähigkeit der Alternativen lassen sich die zugehörigen Trassenpreiseinnahmen ermitteln. Sie bilden die Grundlage zur Bestimmung von Kostendifferenzen. Vorab muss jedoch ermittelt werden, welche Kriterien einen Kostenunterschied hervorrufen können. Da, wie bereits im Abschnitt 3.1 erläutert wurde, die Wirtschaftlichkeit nicht nur von monetären Kriterien abhängt, sondern auch vom nicht monetären Nutzen, sollen die Kostendifferenzen in Abhängigkeit von Nutzwerten ermittelt werden. Jede Alternative weist einen individuellen Gesamtnutzen auf, der sich aus verschiedenen Teilnutzen ergibt. Diese Teilnutzen gilt es hier zu analysieren und in Kostendifferenzen zu transformieren.

Zunächst müssen bei diesem Verfahren Kriterien, nach denen die Alternativen zu bewerten sind, gesucht und eindeutig definiert werden. Dabei sollten alle Faktoren berücksichtigt werden, die zum Gesamtnutzen und somit zu einem repräsentativen Ergebnis beitragen. Ziel des Verfahrens ist eine ganzheitliche Betrachtung des Systems. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass die Kriterien nicht zugunsten einer Alternative formuliert werden. Daher ist es von Vorteil, wenn die Methode von einer Gruppe Experten durchgeführt wird. Somit kann gewährleistet werden, dass alle relevanten Informationen berücksichtigt und eine Manipulation ausgeschlossen wird.

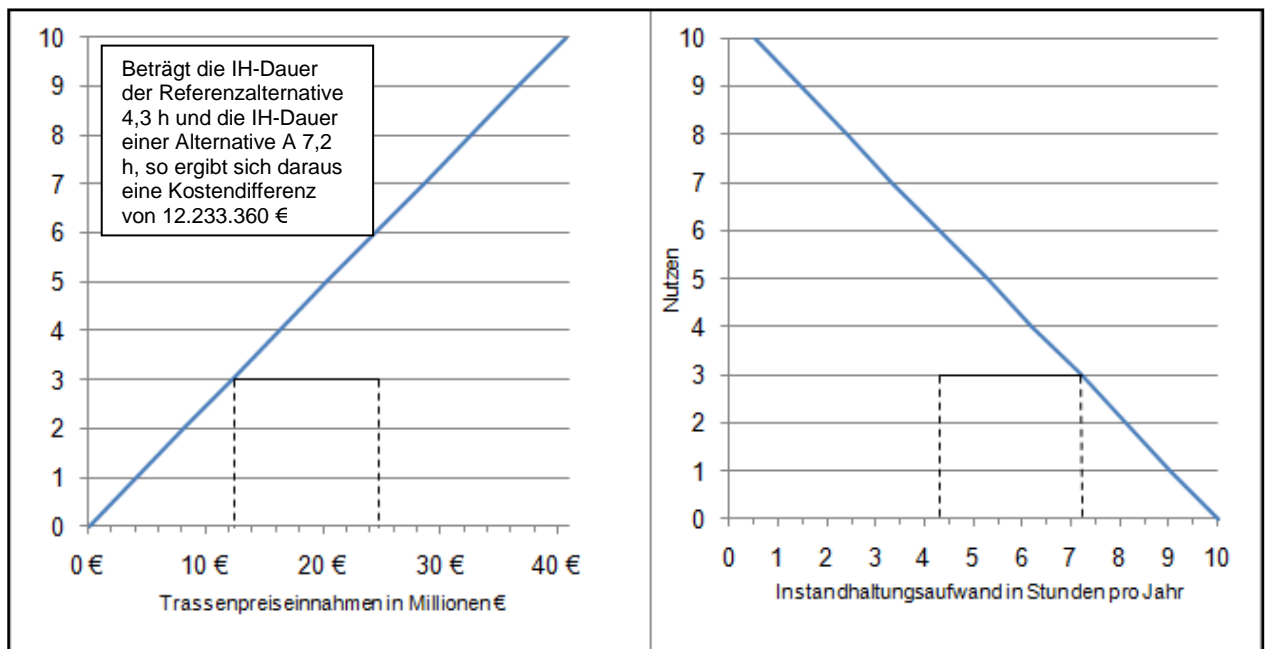
⁷⁵ Vgl. Skiera, B./Gensler, S. (o.J.)

⁷⁶ Vgl. Coenenberg, A. (2003), S. 446

4 Methoden zur Bestimmung eines Zielwertes der Lebenszykluskosten

Anschließend werden die Ausprägungen eines Kriteriums festgelegt. Ihr Nutzen wird, ähnlich wie bei der Nutzwertanalyse, anhand von Punktwerten ausgedrückt. Dadurch ergibt sich für jedes Kriterium jeweils eine lineare Gleichung. Auch der Nutzen der Trassenpreiseinnahmen wird mit Hilfe der Punktwerte in einem Diagramm dargestellt. Dieses Diagramm ermöglicht es, später die Kostendifferenzen zu ermitteln. Nun erfolgt die Bewertung der Investitionsalternativen sowie einer Referenzalternative. Für diese Referenzalternative müssen die vollständigen Kosten über die gesamte Lebensdauer zahlenmäßig bekannt sein. Aus den Diagrammen der einzelnen Kriterien kann für jede Alternative jeweils ein Teilnutzwert bestimmt werden. Diese Teilnutzwerte jeder Alternative werden mit den Teilnutzwerten der Referenzalternative verglichen. Dabei kann sich eine Differenz ergeben, die auf das Diagramm der Trassenpreiseinnahmen übertragen werden kann. Somit wird für jedes bewertete Kriterium einer jeden Alternative eine Kostendifferenz zur Referenzalternative bestimmt (vgl. Abbildung 15). Für die einzelnen Alternativen wird nun die Summe aller Kostendifferenzen gebildet. Diese wird anschließend mit den Gesamtkosten der Referenzalternative verrechnet. Das Ergebnis dieser Methode ist jeweils ein Kostenwert, der in Abhängigkeit vom Nutzen der einzelnen Alternativen aufgewendet werden darf.⁷⁷

Abbildung 15: Beispielhafte Bildung der Kostendifferenz



Quelle: Vgl. Coenenberg, A. (2003), S. 446; eigene Darstellung

⁷⁷ Vgl. Coenenberg, A. (2003), S. 445 ff.

4.4 Bestimmung anhand konkreter Kostenwerte

Die Bestimmung eines Zielwertes für die LCC kann durch die Ermittlung tatsächlicher Kostenwerte erfolgen. Die in Abschnitt 3.2 genannten Kostenbestandteile der LST müssen zahlenmäßig bestimmt werden. Dazu zählen demzufolge:

- Anschaffungskosten
- Betriebsmittelkosten
- Instandhaltungskosten.

Zunächst gilt es die Zusammensetzung der einzelnen Kostenkomponenten zu ermitteln und eine Möglichkeit zur Berechnung darzulegen. Die Anschaffungskosten setzen sich aus dem Kaufpreis sowie den Fremdleistungen zusammen. Die Bestimmung des Kaufpreises der Hardware-Komponenten und der Software wird anhand der Projektierungsregeln von Lackhove und Scheier⁷⁸ vorgenommen. Der Kaufpreis setzt sich nach Bormet⁷⁹ (Abbildung 5) aus den Kosten für Forschung und Entwicklung sowie Fertigung zusammen. Diese Darstellung lässt ebenfalls Rückschlüsse auf die Fremdleistungen (Projektierung und Bau) zu. Somit können die Anschaffungskosten vollständig bestimmt werden.

Die Kosten für Energie und den RBC-Betrieb bilden die Betriebsmittelkosten. Energiekosten ergeben sich für die einzelnen Komponenten der LST. Sie lassen sich mit Hilfe des aktuellen Strompreises, der Betriebsdauer sowie der Anzahl und Leistungsabnahme der einzelnen Bauteile ermitteln. Die Kosten des RBC-Betriebes werden als Vertragskosten jährlich pauschal abgerechnet. Für die Instandhaltungskosten sind ebenfalls die Anzahl der jeweiligen Elemente und die Instandhaltungsdauer relevant. Weiterhin werden Angaben zum Personal- und Materialaufwand benötigt. Die Summe der ermittelten Betriebsmittel- und Instandhaltungskosten bilden die Besitzkosten der jeweiligen Investitionsalternative.

Mit Hilfe dieser Methode können die Lebenszykluskosten ermittelt werden. Um vorab einen Richtwert für die LCC zu erhalten, werden die Trassenpreiseinnahmen bestimmt. Ohne Berücksichtigung der Subventionen und abzüglich einer Rendite von 9 %⁸⁰, die im Bahnwesen durchaus üblich ist, kann somit bestimmt werden, wie hoch die LCC einer Investitionsalternative maximal ausfallen dürfen, um wirtschaftlich zu sein.

⁷⁸ Vgl. Lackhove, C./Scheier, B. (2010)

⁷⁹ Vgl. Bormet (2007)

⁸⁰ Gespräch vom 08.08.2010

4.5 Auswahl einer Methode

Jede dieser drei beschriebenen Methoden ermöglicht es, einen Zielwert für die LCC zu bestimmen. Die Analyse mittels Äquivalenzziffern ist sehr umfangreich, da sie eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Bauteile und Prozesse vorsieht. Im vorgegebenen zeitlichen Rahmen war es nicht möglich, alle hierfür notwendigen Informationen zu erhalten. Daher wird das Verfahren im Rahmen dieser Arbeit nicht verwendet. Auch die angepasste Conjoint Analyse kann nicht zum Einsatz kommen, obwohl sie durchaus zu einem nachvollziehbaren Ergebnis führen kann. Da eine große Anzahl von Kriterien Berücksichtigung finden sollten, um ein repräsentatives Ergebnis zu erzielen, würde die Durchführung dieses Verfahren den Umfang der vorliegenden Arbeit übersteigen. Die angepasste Conjoint Analyse könnte Thema einer weiteren Arbeit sein, bei der zunächst geklärt werden sollte, auf welcher Grundlage die unterschiedlichen Kriterien ausgewählt und definiert werden. Somit bleibt zur Bestimmung eines Zielwertes der LCC lediglich das Verfahren mittels konkreter Kostenwerte. Anhand eines Anwendungsbeispiels soll dieses Verfahren durchgeführt werden.

5 Anwendungsbeispiel

5.1 Vorstellung der Szenarien

Zur Bewertung der Eisenbahninfrastruktur kommen Betriebssimulationen zum Einsatz. Innerhalb einer Simulation wird eine Strecke oder ein Streckennetz vollständig abgebildet. Dieses Modell enthält alle Bestandteile der Infrastruktur einschließlich der Leit- und Sicherungstechnik. Weiterhin werden die Merkmale der fahrzeugseitigen Komponenten hinterlegt. Somit ist eine Abbildung des gesamten Betriebsablaufes möglich. Eine Betriebssimulation erlaubt es, die Strecke hinsichtlich ihrer betrieblichen Anforderungen zu bewerten. Da der Einfluss verschiedener Streckenparameter berücksichtigt werden kann, sind Simulationen für die Bewertung der Leistungsfähigkeit verschiedener Szenarien gut geeignet.

Zur Bemessung der Infrastruktur wird die Konzernrichtlinie 413⁸¹ der Deutschen Bahn AG herangezogen. Diese enthält Streckenstandards zur Gestaltung einer Strecke, um die Anpassung und Entwicklung einer Anlage zielgerichtet zu sichern. Die Szenarien dieser Arbeit beruhen auf dem Streckenstandard M160. Es wird davon ausgegangen, dass die Strecke an der Obergrenze betrieben wird. Die vorgegebene Anzahl der Züge, die auf der Strecke pro Tag und Richtung verkehren dürfen, sind in Summe 150. Sie verteilen sich wie folgt:

- Schienenpersonenfernverkehr (SPFV): 50 (33,33 %)
- Schienenpersonennahverkehr (SPNV): 40 (26,67 %)
- Schienengüterverkehr (SGV): 60 (40 %).

Die M160-Strecke wird mit einer Leitgeschwindigkeit zwischen 121 und 160 km/h und im Mischverkehr betrieben. Sie erstreckt sich über eine Länge von 100 km und verbindet zwei große Bahnhöfe miteinander. Dazwischen befinden sich neun weitere kleine Bahnhöfe. Zur Modellierung der Szenarien sind folgende Standardelemente ebenfalls zu berücksichtigen:

- Anzahl der Gleise: 2
- Gleisabstand auf freier Strecke: 4 m
- Blockabschnittslänge: 3 km

⁸¹ Vgl. DB AG (2002)

Anhand dieser Angaben zur Gestaltung der Infrastruktur wurde eine fiktive Strecke angenommen und mit unterschiedlicher Leit- und Sicherungstechnik ausgestattet. Auf dieser Grundlage ergaben sich die folgenden Szenarien (vgl. Tabelle 2). Die Leistungsfähigkeit der einzelnen Varianten wurde einer wissenschaftlichen Studie zur Bestimmung des Einflusses von ETCS auf die Streckenkapazität entnommen.

Szenario 1: PZB

Hier wird davon ausgegangen, dass die fiktive Strecke mit einer punktförmigen Sicherungstechnik ausgerüstet ist. Sie dient als Referenzszenario und ermöglicht den Vergleich mit einer bereits bekannten Technik. Die Strecke ist mit 344 PZB-Magneten und 190 Signalen ausgerüstet. Sie kann pro Tag und Richtung von 123,3 Zügen befahren werden.

Szenario 2: Level 1 Full Supervision

Das Szenario 2 wird mit ETCS Level 1 Full Supervision ausgestattet. Dabei wird die Bremskurve des Zuges kontinuierlich überwacht und im fahrzeugseitigen System hinterlegt. Das im Referenzszenario bestehende Signalsystem bleibt erhalten. Entlang der fiktiven Strecke sind 190 Lichtsignale verbaut. Die Signale und weitere Gefahrpunkte sind vollständig mit ETCS ausgerüstet. Daher sind für diese Strecke insgesamt 924 Balisen und 275 LEU einzuplanen. Die Bestimmung der Leistungsfähigkeit laut Wendler hat ergeben, dass die Strecke 112,6 Züge pro Tag und Richtung zulässt.⁸²

Szenario 3: Level 1 Limited Supervision

Die Ausstattung der Strecke mit ETCS Level 1 Limited Supervision erfolgt parallel zum bestehenden Signalsystem. Die vollständige Installation von ETCS ist jedoch nur an hoch riskanten Stellen erforderlich. Alle weiteren Punkte werden in vereinfachter Form ausgestattet. Die 190 Signale des Referenzszenarios bleiben bestehen. Für die Ausrüstung der Strecke mit ETCS werden 722 Balisen und 275 LEU benötigt. Die Leistungsfähigkeit von Level 1 Limited Supervision ist mit der Leistungsfähigkeit einer mit PZB ausgerüsteten Strecke vergleichbar. Sie beträgt 123,3 Züge pro Tag und Richtung.⁸³

⁸² Wendler, E. (2008), S. 36

⁸³ ebenda

Szenario 4: Level 2

Wird eine Strecke mit ETCS Level 2 ausgestattet, so ist das bestehende Signalsystem nicht mehr erforderlich. In diesem Fall wird davon ausgegangen, dass die 190 Signale dunkel geschaltet und somit nicht mehr verwendet werden. Entlang der Strecke werden 722 Balisen installiert. Die Übertragung der Telegramme erfolgt hier nicht über die LEU, sondern mit Hilfe des Mobilfunksystems GSM-R. Weiterhin werden vier Radio Block Center, die der Erstellung der Telegramme dienen, benötigt. Die Leistungsfähigkeit der fiktiven Strecke mit einer Level 2-Ausrüstung beträgt 116,8 Züge pro Tag und Richtung.⁸⁴

Tabelle 2: Zusammenfassung der Szenarien

Szenarien	PZB (Referenz)	Level 1 FS	Level 1 LS	Level 2
Überwachung	punktförmig	kontinuierlich	punktförmig	kontinuierlich
Elemente	344 PZB-Magnete, 190 Signale	924 Balisen, 275 LEU, 190 Signale	722 Balisen, 275 LEU, 190 Signale	722 Balisen, 4 RBC, GSM-R
Leistungsfähigkeit ⁸⁵ (Züge/Tag/Richtung)	123,3	112,6	123,3	116,8

Quelle: eigene Darstellung

5.2 Kostenaufstellung

Nachdem die zu bewertenden Szenarien beschrieben wurden, können nun alle relevanten Kostenbestandteile zahlenmäßig bestimmt werden. Die Berechnung der LCC erfolgt anhand der in Abschnitt 3.2 beschriebenen Aufstellung und der Informationen zu den einzelnen Szenarien. Bei den folgenden Berechnungen ist zu berücksichtigen, dass die Referenzstrecke (PZB) bereits vorhanden ist. Das bestehende Signalsystem kann für die neue ETCS-Technik, speziell in Level 1 Full Supervision und Level 1 Limited Supervision, weiter verwendet werden. Die Anschaffungskosten für die Signale müssen somit in den Szenarien 2 und 3 nicht einbezogen werden. Im Szenario 4 erfolgt eine Stilllegung der Signale, d.h. die Signale bleiben physisch vorhanden, werden jedoch dunkel geschaltet und kommen während des Betriebes nicht zum Einsatz. Diese Stilllegung verursacht keine Kosten und muss daher in den Berechnungen nicht berücksichtigt werden.

⁸⁴ Wendler, E. (2008), S. 36

⁸⁵ ebenda

Die Nutzungsdauer einer Leit- und Sicherungstechnik wird auf 20 Jahre festgelegt. Es wird unterstellt, dass die Strecke pro Jahr 365 Tage betrieben wird. Der kalkulatorische Zinssatz beträgt, wie in der Eisenbahnbetriebswirtschaft üblich, 8 %. Die Berücksichtigung einer Inflationsrate soll im Rahmen dieses Anwendungsbeispiels nicht erfolgen, da eine umfassende Aussage über deren zukünftige Entwicklung nicht möglich ist.

Die Anschaffungskosten der einzelnen Szenarien werden mit Hilfe einer prozentualen Verteilung des Anschaffungspreises bestimmt. Die Annahmen beruhen auf Bormet⁸⁶ und wurden bereits im Abschnitt 3.2 dargestellt. Der Kaufpreis wurde auf der Grundlage der Projektierungsregeln von Lackhove und Scheier⁸⁷ ermittelt. Eine ausführliche Zusammenstellung der einzelnen Kostenelemente des Kaufpreises können der Anlage 3 entnommen werden. Der Kaufpreis dient als Grundlage zur Ermittlung der anderen Bestandteile des Anschaffungspreises. Die Anschaffungskosten ergeben sich abzüglich eines Anteils von 15 %, die laut Bormet⁸⁸ der Phase des Betriebes und der Instandhaltung zugerechnet werden. Die Anlage 4 zeigt die Zusammensetzung der Anschaffungskosten.

Die erforderlichen Informationen zur Bestimmung der Betriebsmittelkosten wie Energie und die Kosten des RBC-Betriebes konnten im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht ermittelt werden. Lediglich die Kosten für den Betrieb des GSM-R-Netzes in Szenario 4 konnte anhand der Preise für ein EVU abgeleitet werden. Sie setzen sich aus den Kosten für Telefonie und Datenübertragungen zusammen (vgl. Anlage 5). Eine Einteilung der Instandhaltungskosten in die Kosten der Instandhaltung und die Kosten der Instandsetzung, wie es bei der DB Netz AG erfolgt, konnte innerhalb dieser Arbeit nicht erfolgen. Die vorhandenen Informationen ließen lediglich Aussagen über die Personalkosten und den Materialaufwand zu. In Abhängigkeit von der Art und der Anzahl der Bauteile konnten die jährlichen Instandhaltungskosten bestimmt werden (vgl. Anlage 6). Die Kosten werden als konstant angesehen und fließen jedes Jahr in gleicher Höhe in die Berechnungen ein. Die Anlage 7 zeigt eine Zusammenstellung der jährlichen Besitzkosten.

Die Summe der berechneten Kostenbestandteile ergeben die Lebenszykluskosten der verschiedenen Investitionsalternativen. Dabei wurden jedoch nur die Kosten berücksichtigt, die die Höhe der LCC maßgeblich beeinflussen. Die Tabelle 3 zeigt

⁸⁶ Vgl. Bormet (2007)

⁸⁷ Vgl. Lackhove, C./Scheier, B. (2010)

⁸⁸ Vgl. Bormet (2007)

den Barwert der LCC der einzelnen Szenarien. Eine Darstellung der Kosten über die gesamte Nutzungsdauer kann den Anlagen 8 bis 11 entnommen werden.

Tabelle 3: Lebenszykluskosten

	PZB	Level 1 FS	Level 1 LS	Level 2
Barwert der Lebenszykluskosten	8.919.375,53 €	15.687.827,51 €	9.519.052,75 €	26.169.180,06 €

Quelle: eigene Darstellung

5.3 Trassenpreiseinnahmen

Die Bestimmung des monetären Nutzens richtet sich nach dem Trassenpreissystem der DB Netz AG und dem definierten Streckenstandard M160 der Konzernrichtlinie 413⁸⁹. Die in Abschnitt 5.1 gemachten Aussagen bezüglich des Streckenstandards sind die Grundlage zur Ermittlung der nutzenabhängigen Komponente. Die M160-Strecke zählt zur Streckenkategorie F3. „Strecken der Kategorie F3 sind Mischbetriebsstrecken, die überwiegend im Geschwindigkeitsbereich zwischen 101 bis 160 km/h befahren werden.“⁹⁰ Der Grundpreis beträgt daher 2,68 €/Trkm (Trassenkilometer). Zur Bestimmung des Trassenproduktes müssen alle, die Strecke befahrenden Züge definiert werden. Im Bereich des Personenverkehrs ergibt sich eine Personenverkehrs-Takt-Trasse. Sie zeichnet sich durch Zugfahrten von mindestens vier Zug-paaren am Tag aus, die zu einem Taktsystem verknüpft sind. Ein solches Taktsystem wird in diesem Anwendungsbeispiel unterstellt. Die Takt-Trassen werden in Nah- und Fernverkehrsstrecken unterschieden. Bei der Trasse für den Schienengüterverkehr handelt es sich um eine Güterverkehrs-Standard-Trasse. Alle Züge des Güterverkehrs können diese Trasse, die über Anschlüsse zu anderen Güterverkehrs-Standard-Trassen verfügt, nutzen. Dabei müssen jedoch feste Ankunftszeiten gewährleistet werden. Die Erfüllung dieses Sachverhalts wird im Rahmen des Anwendungsbeispiels unterstellt. Den jeweiligen Trassenprodukten werden Faktoren zugeordnet, die bei der Berechnung der Trassenentgelte berücksichtigt werden müssen. Die Personenverkehrs-Takt-Trassen erhalten den Faktor 1,65. Der Güterverkehrs-Standard-Trasse wird der Faktor 1,00 zugeordnet. Weiterhin sind der Regionalfaktor, der in diesem Anwendungsbeispiel mit „1“ angenommen wird, und die Streckenlänge (100 km) zur Berechnung erforderlich.

Grundlage für die Berechnung der Zuganzahl der Trassenprodukte ist die laut Streckenstandard M160 angegebene prozentuale Verteilung der Züge. Basierend auf

⁸⁹ Vgl. DB AG (2002)

⁹⁰ DB Netz AG (2009), S. 4

der tatsächlichen Leistungsfähigkeit (Züge pro Tag und Richtung) der Strecke, die sich für die einzelnen Szenarien ergeben, kann somit die Anzahl der Trassenprodukte je Szenario berechnet werden. Die Gesamtzuganzahl je Trassenprodukt ergibt sich aus der Summe der jeweils pro Tag in beiden Richtungen verkehrenden Züge. Der Anlage 12 können die Trassenpreise des jeweiligen Trassenproduktes entnommen werden. Außerdem werden die erzielbaren Trassenentgelte pro Jahr dargestellt.⁹¹

Mit Hilfe der Trassenentgelte abzgl. einer Rendite von 9 % muss das EIU die gesamten Kosten der Infrastruktur decken. Die Leit- und Sicherungstechnik ist nur ein kleiner Teil der Infrastruktur. Zur Deckung der Kosten der LST steht somit nur ein gewisser Teil der Trassenentgelte zur Verfügung. Um diesen Anteil hinreichend zu bestimmen, wurden die Investitionen in die LST der Jahre 2006 bis 2008 den Geschäftsberichten der DB Netz AG entnommen. Weiterhin konnten die Brutto-Investitionen in die Infrastruktur ermittelt werden. Diese Angaben ermöglichen die Berechnung eines durchschnittlichen prozentualen Anteils der Investitionen in die LST (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 4: Prozentualer Anteil der Trassenentgelte

Jahr	2008	2007	2006	Ø
Brutto-Investitionen (in Mio. €)	4.621	4.423	4.400	
Investitionen in LST (in Mio. €)	534	442	500	
prozentualer Anteil	11,56 %	9,99 %	11,36 %	11,00 %

Quelle: DB Netz AG (2009a, 2008, 2007); eigene Darstellung

Den Berechnungen zu Folge werden ca. 11 % der Brutto-Investitionen für die LST aufgewendet. Bei den weiteren Berechnungen wird angenommen, dass die Gesamtausgaben für eine LST sich in gleicher prozentualer Höhe bewegen dürfen wie die Investitionen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass ca. 11 % der Trassenentgelte (abzgl. 9% Rendite) allein für die LST verfügbar sind (vgl. Formel 5).

$$\text{Verfügbare finanz. Mittel LST} = 0,11 * (\text{Trassenentgelte} - \text{Rendite}) \quad (5)$$

⁹¹ Vgl. DB Netz AG (2009)

Die folgende Darstellung (vgl. Tabelle 5) zeigt den gesamten monetären Nutzen sowie die Absolutwerte der anteilig zur Verfügung stehenden Trassenentgelte.

Tabelle 5: Monetärer Nutzen und finanzielle Mittel für LST
(bezogen auf 100 km Streckenlänge)

	PZB	Level 1 FS	Level 1 LS	Level 2
Trassenentgelte	33.532.696,00 €	30.619.127,30 €	33.532.696,00 €	31.765.088,60 €
9 % Rendite	3.017.942,64 €	2.755.721,46 €	3.017.942,64 €	2.858.857,97 €
Finanz. Mittel Infra.	30.514.753,36 €	27.863.405,84 €	30.514.753,36 €	28.906.230,63 €
Finanz. Mittel LST (11%)	3.356.622,87 €	3.064.974,64 €	3.356.622,87 €	3.179.685,37 €

Quelle: eigene Darstellung

5.4 Zielwertbestimmung

Die Bestimmung eines Zielwertes für die LCC soll anhand konkreter Kostenwerte erfolgen. Dies erfordert die Ermittlung der gesamten Lebenszykluskosten. Dazu können die in Abschnitt 5.2 ermittelten Kostenbestandteile herangezogen werden. Da es aufgrund der fehlenden Informationen nicht möglich war, die vollständigen Betriebsmittelkosten der einzelnen Szenarien zu bestimmen, wird auf den monetären Nutzen zurückgegriffen. Die für die LST verfügbaren finanziellen Mittel stellen einen maximalen Wert dar, der für eine Investitionsalternative zur Deckung der Kosten eingesetzt werden darf. Eine Alternative darf über die gesamte Nutzungsdauer maximal diesen Wert an Kosten verursachen, um wirtschaftlich zu sein.

Auf dieser Grundlage lässt sich ein Zielwert bestimmen, der zur Deckung aller weiteren Kosten, wie z.B. Betriebskosten, zur Verfügung steht. Die in Abschnitt 5.2 berechneten Kostenbestandteile werden von den für eine LST verfügbaren finanziellen Mittel abgezogen (vgl. Formel 6). Da die Stellwerksanlagen zur LST zählen, müssen ebenfalls die Betriebs- und Instandhaltungskosten dieser Anlagen (vgl. Anlage 13) Berücksichtigung finden und mit dem maximalen Kostenwert verrechnet werden (vgl. Tabelle 6).

$$\text{Restbetrag} = \text{verfügbare finanz. Mittel LST} - K_A - K_B - \text{ESTW} \quad (6)$$

Tabelle 6: Zielwertbestimmung (bei einer Nutzungsdauer von 20 Jahren)

Szenario	PZB	Level 1 FS	Level 1 LS	Level 2
Finanz. Mittel LST	67.132.457,39 €	61.299.492,85 €	67.132.457,39 €	63.593.707,38 €
K_A	7.852.300,00 €	14.137.625,00 €	8.473.791,67 €	23.851.000,00 €
K_B	2.173.680,00 €	3.157.831,00 €	2.129.243,00 €	4.722.235,20 €
ESTW	4.506.400,00 €	4.506.400,00 €	4.506.400,00 €	4.506.400,00 €
gesamter Restbetrag	52.600.077,39 €	39.497.636,85 €	52.023.022,73 €	30.514.072,18 €
jährlicher Restbetrag	2.630.003,87 €	1.974.881,84 €	2.601.151,14 €	1.525.703,61 €

Quelle: eigene Darstellung

Der Zielwert ergibt sich aus der Summe der Einnahmen abzgl. der Ausgaben für K_A, K_B und das ESTW, die während der gesamten Nutzungsdauer eintreten. Da die vorhandene Datenbasis die Berechnung aller Kostenbestandteile nicht zuließ, gibt dieser Zielwert einen Restbetrag an, der zur Deckung aller weiteren, während der Nutzungsdauer auftretenden, Kosten zur Verfügung steht. Ist dieser Restbetrag nicht ausreichend um diese Kosten zu decken, sollte die Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Alternative in Frage gestellt werden.

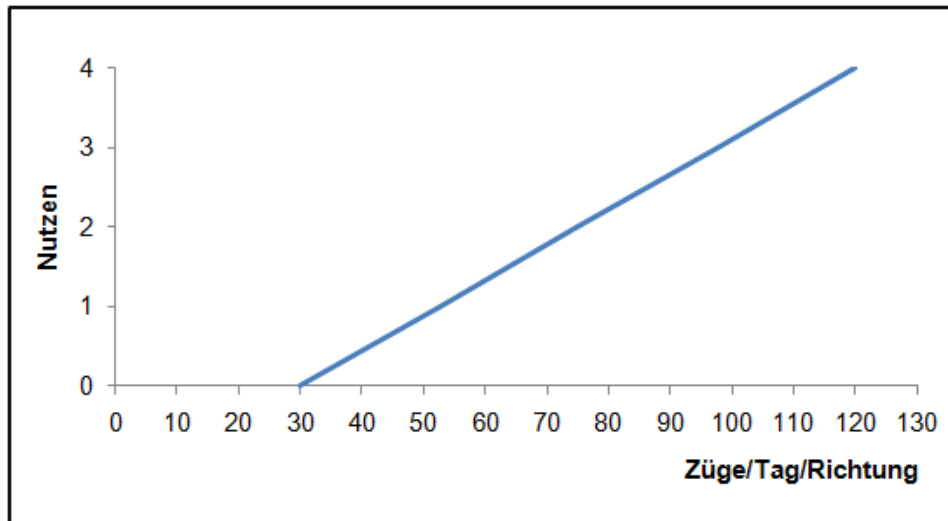
5.5 Nutzwertanalyse

Um nicht nur die Kostenseite zu berücksichtigen, sondern auch den direkten Nutzen der einzelnen Alternativen festzustellen, wurden die Szenarien einer Nutzwertanalyse unterzogen. Die Kriterien wurden so gewählt, dass sie im Rahmen dieser Arbeit bewertet werden konnten. Die Ausprägung der Kriterien ist unmittelbar von der LST abhängig. Im Folgenden werden die Nutzenkriterien bestimmt und die Durchführung der Analyse (vgl. Abbildung 14) beschrieben.

Zur Bewertung der gewählten Nutzenkriterien wird eine Punkteskala von null bis vier herangezogen. Die Gewichtung erfolgt anhand des Matrixverfahrens.

Leistungsfähigkeit

Die Leistungsfähigkeit gibt an, wie viele Züge pro Tag und je Richtung maximal auf der Strecke verkehren können. Sie beeinflusst die Höhe der Trassenpreiseinnahmen und geht somit in den monetären Nutzen ein. Da die Ergebnisse der Nutzwertanalyse als ein zusätzliches Analyseinstrument angewendet werden, kann dieses Kriterium Berücksichtigung finden. Die Bewertung des Kriteriums Leistungsfähigkeit erfolgt anhand einer Wertefunktion. Die höchste erzielbare Leistungsfähigkeit wird mit vier Punkten bewertet. Bei Ausfall der LST auf der Strecke kann lediglich eine Leistungsfähigkeit von 30 Zügen pro Tag und je Richtung erreicht werden. Für diesen Wert wird die niedrigste Punktzahl vergeben. Daraus ergibt sich eine Wertefunktion für das Kriterium Leistungsfähigkeit (vgl. Abbildung 16).

Abbildung 16: Leistungsfähigkeit

Quelle: eigene Darstellung

Höchstgeschwindigkeit

Dieses Kriterium berücksichtigt die maximale Geschwindigkeit, die mit der jeweiligen LST gefahren werden darf. Eine hohe Geschwindigkeit stellt einen höheren Nutzen für den Kunden, also das EVU, dar. Weiterhin kann durch höhere Geschwindigkeiten der Betriebsablauf flexibler gestaltet werden. Daher hat das Kriterium Höchstgeschwindigkeit einen Einfluss auf die Attraktivität der LST. Die vorhandenen Informationen zur möglichen Höchstgeschwindigkeit beschränken sich jedoch auf die Angabe, ob Geschwindigkeiten über oder unter 160 km/h erlaubt sind. Die Bewertung dieses Kriteriums erfolgt demzufolge ähnlich einer Ja/Nein-Entscheidung. Ist die LST für Geschwindigkeiten über 160 km/h ausgelegt, so wird sie mit vier Punkten bewertet. Die niedrigste Punktzahl erhalten die LST, bei denen Geschwindigkeiten unter 160 km/h erlaubt sind (vgl. Tabelle 7).

Tabelle 7: Höchstgeschwindigkeit

Höchstgeschwindigkeit	Bewertung
≤ 160 km/h	0
> 160 km/h	4

Quelle: eigene Darstellung

Sicherheit

Die LST muss ein hohes Maß an Sicherheit erfüllen. Diese wird mit Hilfe des Safety Integrity Level (SIL) beschrieben. „Er dient der Beurteilung elektrischer, elektronischer und programmierbarer elektronischer Systeme in Bezug auf die Zuverlässigkeit von Sicherheitsfunktionen.“⁹² Es gibt vier Stufen zur Definition der Sicherheitsfunktionen, wobei SIL 1 die niedrigste und SIL 4 die höchste Stufe darstellt. Es gibt jedoch auch Systeme, die keinerlei Sicherheitsanforderungen erfüllen. Diese werden in der Praxis häufig mit dem „Safety Integrity Level 0“ bezeichnet. Dies bedeutet, dass das System keinen Sicherheitsstandard besitzt. Die Sicherheit einer LST ist besonders wichtig. Sie gewährleistet, dass mögliche Schäden gering gehalten bzw. verhindert werden. Je höher die Sicherheit, umso geringer ist das Risiko eines Schadens. Somit kann auch die Höhe der Strafzahlungen und Schadensersatzleistungen, die mit den Schäden einhergehen, gemindert werden. Die folgende Tabelle zeigt die Punkteverteilung zur Bewertung des Kriteriums Sicherheit.

Tabelle 8: Sicherheit

Sicherheitsstandard	Bewertung
kein Standard	0
SIL 1	1
SIL 2	2
SIL 3	3
SIL 4	4

Quelle: eigene Darstellung

Signalaufwertung

Bei diesem Kriterium wird die Möglichkeit einer Signalaufwertung beurteilt. Dabei wird geprüft, ob eine Aufwertung des Signalbegriffs möglich ist und zu welchem Zeitpunkt diese Aufwertung stattfindet. Die Signalaufwertung beeinflusst eventuell auftretende Verspätungsminuten. Je eher eine Aufwertung des Signals erfolgt, umso schneller kann der Triebfahrzeugführer wieder auf die erlaubte Streckengeschwindigkeit beschleunigen und somit mögliche Verzögerungen im Betriebsablauf verhindern. Da Verspätungen mit Geldzahlungen bestraft werden, ist eine schnelle Signalaufwertung besonders wichtig. Die Bewertung des Kriteriums kann der folgenden Tabelle entnommen werden.

⁹² o.V. (o.J.a)

Tabelle 9: Signalaufwertung

Signalaufwertung	Bewertung
keine Signalaufwertung möglich	0
Signalaufwertung mit starken Einschränkungen möglich	1
Signalaufwertung mit mäßigen Einschränkungen möglich	2
Signalaufwertung mit leichten Einschränkungen möglich	3
Signalaufwertung kontinuierlich möglich	4

Quelle: eigene Darstellung

Rückfallebene

Dieses Kriterium berücksichtigt die Folgen eines möglichen Ausfalls des jeweiligen Zugbeeinflussungssystems. Fällt das verwendete Zugbeeinflussungssystem aus, so kann auf das eventuell noch vorhandene Signalsystem zurückgegriffen werden oder der Triebfahrzeugführer muss auf Sicht fahren. Jede dieser Möglichkeiten besitzt eine restriktive Geschwindigkeit, die sich maßgebend auf die Leistungsfähigkeit der Strecke auswirkt. Demnach wird das Fahren auf Sicht mit der niedrigsten Punktzahl bewertet. Die andere Rückfallebene bekommt die größtmögliche Punktzahl zugeordnet (vgl. Tabelle 10).

Tabelle 10: Rückfallebene

Rückfallebene	Bewertung
Fahren auf Sicht, 40 km/h	0
Fahren nach Signalsystem, 100 km/h	4

Quelle: eigene Darstellung

Interoperabilität

Gegenstand dieses Kriteriums ist die Einsatzfähigkeit der Zugbeeinflussungssysteme in Eisenbahnnetzen verschiedener europäischer Staaten. Die Interoperabilität ermöglicht einen uneingeschränkten, grenzübergreifenden Verkehr. Da sie für jede Neuausrüstung einer Strecke gesetzlich vorgeschrieben ist, spielt dieses Kriterium eine wesentliche Rolle bei der Bestimmung der Wirtschaftlichkeit einer LST. Außerdem bestehen diverse Förderprogramme der EU, die eine schnelle Umsetzung der Interoperabilität unterstützen. Hier können sich gegebenenfalls wirtschaftliche Vor-

teile für das EIU ergeben. Aufgrund kompatibler Systeme sind Mehrfachausrüstungen der Fahrzeuge durch das EVU nicht mehr notwendig. Daher steigert eine interoperable LST die Attraktivität des Infrastrukturanbieters. Bei der Bewertung der Interoperabilität handelt es sich um eine klare Ja/Nein-Entscheidung. Daher wird eine positive Entscheidung mit vier Punkten bewertet. Einem „Nein“ wird jedoch die niedrigste Punktzahl zugeordnet (vgl. Tabelle 11).

Tabelle 11: Interoperabilität

Interoperabilität	Bewertung
Nein	0
Ja	4

Quelle: eigene Darstellung

Anschließend müssen die gewählten Kriterien gewichtet werden. Die Gewichtung der vorgegebenen Kriterien wurde im Rahmen dieser Arbeit von mehreren Eisenbahnexperten des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (Institut für Verkehrssystemtechnik) in einer dafür erstellten Matrix (vgl. Anlage 14) vorgenommen. Dies ermöglichte es, das Wissen und die Meinung verschiedener Spezialisten zu berücksichtigen. Aus den vorgenommenen Gewichtungen der Experten wurde der Durchschnitt gebildet, um so eine Gesamtgewichtung zu erhalten (vgl. Tabelle 12).

Tabelle 12: Gewichtung der Kriterien

Gewichtung	ScB	BoT	GrM	PeM	KoJ	LaC	SuT	HtE	Ø
Sicherheit	32	32	33	33	25	28	32	32	31
Leistungsfähigkeit	23	23	15	17	17	18	25	18	20
Höchstgeschwindigkeit	8	10	10	12	23	7	12	13	12
Signalaufwertung	7	12	15	13	10	12	5	10	10
Interoperabilität	17	17	7	7	13	20	13	10	13
Rückfallebene	13	7	20	18	12	15	13	17	14

Quelle: eigene Darstellung

Die Bewertung der Szenarien wurde ebenfalls unter Absprache mit Experten des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt durchgeführt. Die Leistungsfähigkeit der Szenarien konnte, wie bereits in Abschnitt 5.1 erwähnt, der Fallstudie von Wendler⁹³ entnommen werden. Die Punktevergabe erfolgte anhand der beschriebenen Wertefunktion.

⁹³ Vgl. Wendler, E. (2008)

Die erlaubte Höchstgeschwindigkeit nimmt bei den Szenarien 1 bis 3 Werte unter bzw. gleich 160 km/h an. Lediglich das Szenario 4 (Level 2) lässt Geschwindigkeiten über 160 km/h zu. Das neue Zugsteuerungssystem ETCS wurde nach SIL 4 zertifiziert. Allerdings kann in Level 1 Limited Supervision nur die gleiche Sicherheit gewährleistet werden, wie das aktuelle nationale System ermöglicht.⁹⁴ Die PZB erfüllt den Sicherheitsstandard SIL 1.⁹⁵ Die Punkte konnten somit wie in Tabelle 8 zugeordnet werden.

Eine Signalaufwertung bei der PZB ist grundsätzlich möglich. Mit Hilfe eines 300 m vor dem Hauptsignal befindlichen PZB-Magneten kann die Aufwertung des Signalbegriffs übermittelt werden. Ein Triebfahrzeugführer kann sich nach Erreichen einer definierten Endgeschwindigkeit aus der Überwachung befreien. Ist der PZB-Magnet dann unwirksam geschaltet, da eine Beeinflussung nicht notwendig ist (z.B. bei Fahrtstellung des Signals), so kann der Triebfahrzeugführer den Zug wieder beschleunigen. Überfährt der Zug einen scharf geschalteten PZB-Magneten, so ist eine Befreiung aus der Überwachung nicht mehr möglich. Der Triebfahrzeugführer muss mit restriktiver Geschwindigkeit bis zum Hauptsignal weiterfahren. Aufgrund dieser starken Einschränkung kann das Szenario 1 nur mit einem Punkt bewertet werden. Level 1 Full Supervision erhält ebenfalls nur einen Punkt. Die Signalaufwertung gestaltet sich hier wie bei dem Szenario 1. Der Unterschied besteht hier lediglich im Bauteil, dass die Signalaufwertung übertragen kann. Die Übertragung des neuen Signalbegriffs kann bei Level 1 Full Supervision mit Hilfe einer Infill-Balise erfolgen. Die schlechteste Bewertung erhält das Szenario 3 (ETCS Level 1 Limited Supervision), da eine Signalaufwertung aufgrund einer fehlenden Infill-Balise nicht möglich ist. ETCS Level 2 hingegen ermöglicht eine kontinuierliche Übertragung des Signalbegriffs. Die neue Movement Authority wird über Radio-Infill übertragen und ermöglicht eine Beschleunigung direkt nach der Aufwertung. Daher wird dem Szenario 4 die höchste Punktzahl zugeordnet.⁹⁶

Nach Ausfall des Zugbeeinflussungssystems kann bei den Szenarien 1 und 3 auf das vorhandene Signalsystem zurückgegriffen werden. Die Strecke kann mit Geschwindigkeiten bis zu 100 km/h weiter befahren werden. Die Rückfallebene der Szenarien 2 und 4 hingegen ermöglicht lediglich eine Weiterfahrt der Züge mit 40 km/h. Bei Ausfall des Zugbeeinflussungssystems muss der Triebfahrzeugführer auf Sicht fahren. Dies ist erforderlich, da im Szenario 4 kein Signalsystem mehr vorhan-

⁹⁴ Vgl. Winter, P. (2005), S. 27

⁹⁵ Gespräch vom 12.04.2010

⁹⁶ Vgl. Scheier, B. (2010)

den ist und im Szenario 2 nicht davon ausgegangen werden kann, dass der Triebfahrzeugführer das nationale Signalsystem kennt. Die Punktevergabe erfolgt anhand der Tabelle 10.⁹⁷

Das neue Zugbeeinflussungssystem ETCS ist interoperabel und fördert somit den grenzüberschreitenden Verkehr. Die Szenarien 2, 3 und 4 werden daher mit vier Punkten bewertet. Das Referenzszenario (PZB) kann nicht als interoperabel angesehen werden. Demzufolge wird diesem Szenario die niedrigste Punktzahl zugeordnet.

Die folgende Tabelle zeigt die Bewertung der Szenarien.

Tabelle 13: Bewertung

Nutzenkriterien	Gew.	PZB		Level 1 FS		Level 1 LS		Level 2	
		Bew.	gew. Bew.	Bew.	gew. Bew.	Bew.	gew. Bew.	Bew.	gew. Bew.
Leistungsfähigkeit	20	4	80	3	60	4	80	3	60
Höchstgeschwindigkeit	12	0	0	0	0	0	0	4	48
Sicherheit	31	1	31	4	124	1	31	4	124
Signalaufwertung	10	1	10	1	10	0	0	4	40
Rückfallebene	14	4	56	0	0	4	56	0	0
Interoperabilität	13	0	0	4	52	4	52	4	52
Summe	100	10	177	12	246	13	219	19	324

Quelle: eigene Darstellung

5.6 Auswertung

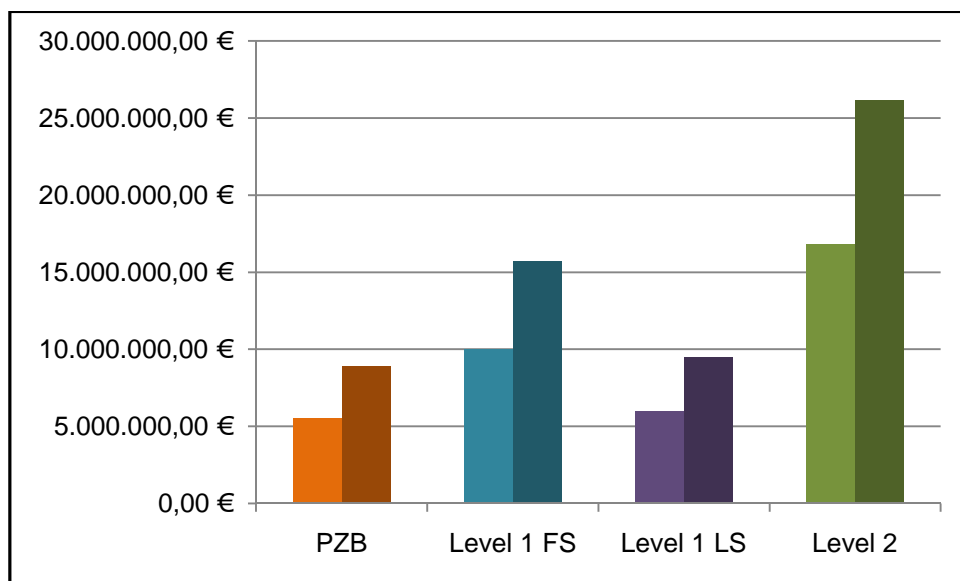
Zunächst werden nur die monetären Kriterien betrachtet. Dazu können der Barwert der Lebenszykluskosten sowie der Barwert des Überschusses herangezogen werden. Der Überschuss ergibt sich aus den jährlich verfügbaren finanziellen Mittel für eine LST abzüglich der jährlich anfallenden Kosten (vgl. Formel 7). Mit Hilfe der Kapitalwertmethode wird ein Barwert der Überschüsse, die sich während der Nutzungsdauer ergeben, gebildet.

$$\text{Überschuss} = \text{verfügbare finanz. Mittel LST} - \text{Kosten} \quad (7)$$

⁹⁷ ebenda

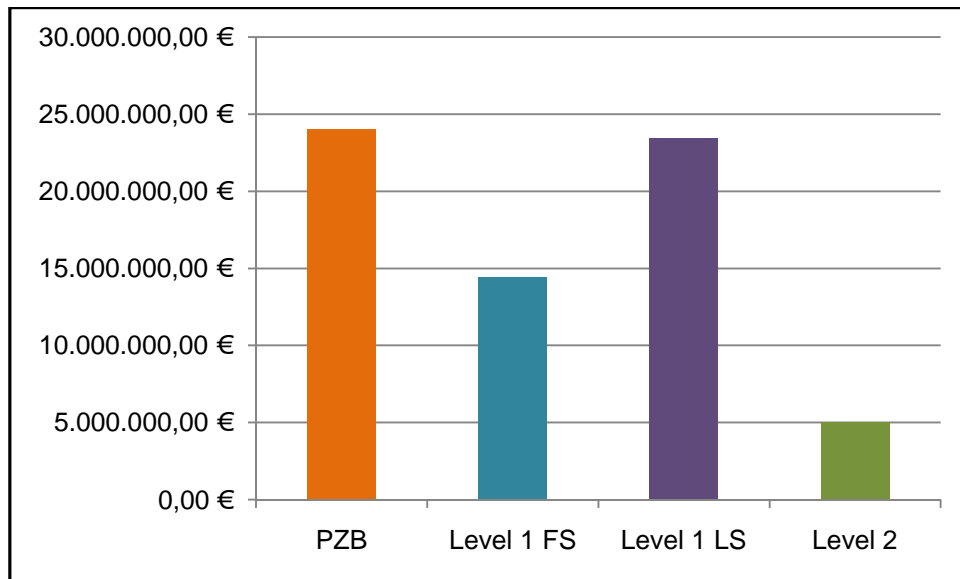
Hier wird schnell klar, dass das Szenario 4 (ETCS Level 2) die höchsten Kosten verursacht. Dies lässt sich vor allem mit den Hardware-Komponenten des Systems und den umfangreichen Programmierungsarbeiten erklären. Der Kaufpreis des Szenario 4 übersteigt bereits den der anderen Szenarien deutlich (vgl. Abbildung 17). Trotz der geringen Instandhaltungskosten für die Hardware-Komponenten übersteigen die gesamten Besitzkosten die der anderen Szenarien um ca. 100.000 € jährlich. Somit ergibt sich ein Barwert der Lebenszykluskosten von 26.169.180,06 €. Werden die jährlichen Kosten nun mit den verfügbaren finanziellen Mitteln einer LST verrechnet, so beträgt der Barwert des Überschusses lediglich 5.049.439,60 €. Dies lässt sich auf die hohen Anschaffungskosten zurückführen. Diese müssen, zusätzlich zu den jährlichen Besitzkosten, von den verfügbaren Mitteln finanziert werden. Weiterhin wird deutlich, dass die Szenarien 1 und 3 in etwa gleich abschneiden (vgl. Abbildung 18). Die Analyse des Kaufpreises und der Besitzkosten führen zu ähnlichen Ergebnissen. Somit fallen auch die Barwerte der Lebenszykluskosten sowie des Überschusses annähernd in derselben Höhe aus.

Abbildung 17: Kaufpreis und Barwert der LCC



Quelle: eigene Darstellung

Das Szenario 2 nimmt eine Mittelstellung ein und führt ebenfalls zu akzeptablen Werten. Der Barwert der Lebenszykluskosten von 15.687.827,51 € übersteigt den Barwert der LCC von Szenario 1 und 3 um ca. 7.000.000 €, fällt aber längst nicht so hoch wie der des Szenario 4 aus. Ähnlich verhält es sich mit dem Barwert des Überschusses. Dieser beträgt 14.404.545,33 € und liegt somit deutlich über dem Barwert des Überschusses von Szenario 4.

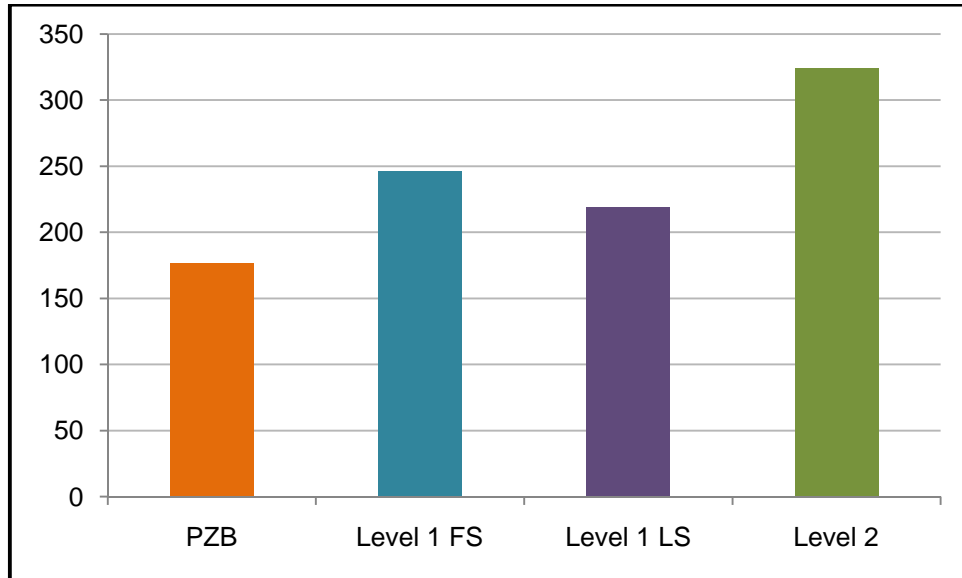
Abbildung 18: Barwert des Überschusses

Quelle: eigene Darstellung

Die Betrachtung der monetären Werte allein zeigt, dass sich das Referenzsystem PZB und das neue Zugbeeinflussungssystem ETCS Level 1 Limited Supervision nicht wesentlich voneinander unterscheiden. Demzufolge können beide Varianten im selben Maße als wirtschaftlich erachtet werden. Die Analyse der Lebenszykluskosten und des Überschusses ergibt, dass diese beiden Szenarien am vorteilhaftesten sind. Das Szenario 2 kann ebenso als wirtschaftlich angesehen werden, da der Barwert des Überschusses einen deutlich positiven Wert aufweist. Das Szenario 4 weist zwar ebenfalls einen positiven Barwert des Überschusses auf, kann hier jedoch nicht als wirtschaftlich bezeichnet werden. Der Grund dafür sind die noch nicht berücksichtigten Kosten. Dabei handelt es sich vorwiegend um Energiekosten, zu deren Berechnung die notwendigen Informationen nicht verfügbar waren. Es kann nicht garantiert werden, dass der geringe Barwert des Überschusses ausreicht, um diese zusätzlichen Kosten zu decken.

Weiterhin wurde der Nutzen der einzelnen Szenarien untersucht. Die Nutzwerte werden zur Auswertung schematisch dargestellt (vgl. Abbildung 19). Die Analyse zeigt, dass das Szenario 4 mit Abstand den größten Nutzwert erzielt. ETCS Level 2 bietet dem EIU einen erheblichen Mehrwert gegenüber den anderen Alternativen. Dies lässt sich auf die Flexibilität im Betrieb zurückführen, die mit Hilfe dieser Technik erzielt werden kann. Auf dem zweiten Rang liegt das Szenario 2, dicht gefolgt von Szenario 3. Das Referenzsystem PZB konnte lediglich 177 Punkte erreichen und liegt demzufolge auf Rang vier. Hier wird deutlich, dass die alte Technik gegenüber ETCS einen wesentlich geringeren Nutzen aufweist.

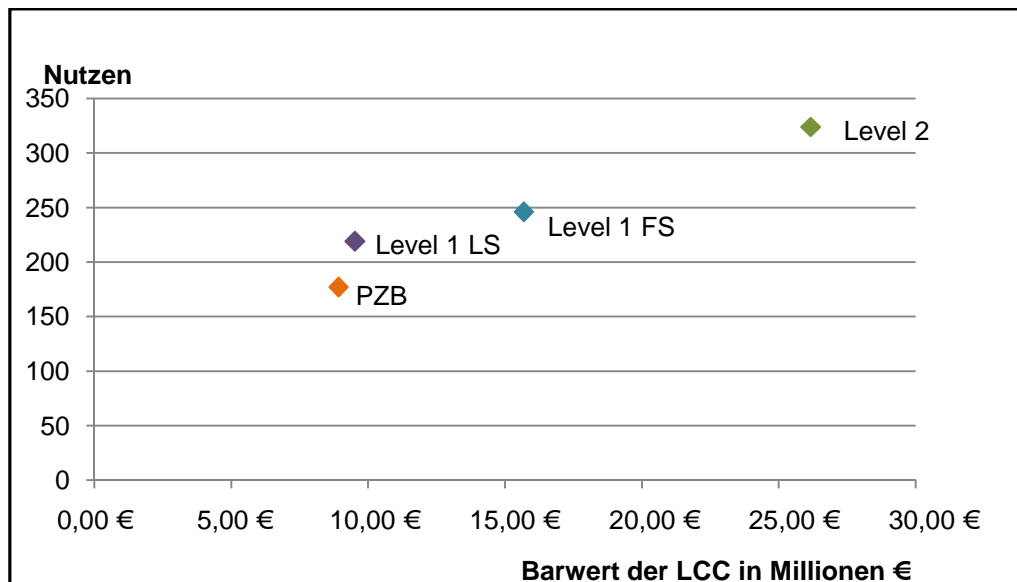
Abbildung 19: Nutzwertanalyse



Quelle: eigene Darstellung

Nun werden die Ergebnisse der Nutzwertanalyse und die Barwerte der Lebenszykluskosten gemeinsam betrachtet. Zur Darstellung der Ergebnisse wurde die Portfoliotechnik gewählt. Die Abbildung 20 stellt die Szenarien gegenüber.

Abbildung 20: Portfolio-Darstellung



Quelle: eigene Darstellung

Die Referenzalternative verursacht zwar die geringsten Kosten, hat aber bei der Nutzwertanalyse am schlechtesten abgeschnitten. Gegenüber der ETCS-Technik ist die PZB ein veraltetes System. Daher kann diese Alternative nicht als vorteilhaft angesehen werden. Das Szenario 4 bringt dem EIU den größten Nutzen. Jedoch verursacht es mit Abstand die höchsten Kosten. Die Kosten für diese Investitionsalternative sind in Bezug auf den erzielbaren Nutzen unverhältnismäßig hoch.

Die Analysen haben ergeben, dass die Szenarien 2 und 3 durchaus als wirtschaftlich angesehen werden können. Die Kostensteigerung der jeweiligen Alternative lässt sich mit dem Vorteil, den diese Techniken gegenüber der PZB-Variante erbringen, rechtfertigen. Welche der beiden Alternativen am vorteilhaftesten ist, kann nicht explizit gesagt werden. Je nach Einzelfall sollte geprüft werden, ob ETCS Level 1 Full Supervision erforderlich ist oder ob ETCS Level 1 Limited Supervision ausreicht.

6 Zusammenfassung und Fazit

Ziel der Diplomarbeit war es verschiedene Modi des neuen Zugsteuerungssystems ETCS (European Train Control System) zu bewerten. Zur Bearbeitung der Diplomarbeit wurden verschiedene ETCS-Modi (Level 1 Full Supervision, Level 1 Limited Supervision, Level 2) sowie eine konventionelle Referenzausrüstung (PZB) vorgegeben. Informationen zu deren Leistungsfähigkeit und Abschätzungen der Anschaffungskosten wurden bereitgestellt.

Zunächst wurden alle grundlegenden Fakten über die Leit- und Sicherungstechnik sowie ETCS zusammengetragen. Anschließend erfolgte die Analyse der Lebenszykluskosten einer Eisenbahninfrastruktur. Diese hat ergeben, dass zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von ETCS nicht alle Kostenelemente eine Rolle spielen. Einige Punkte konnten entfallen, da sie keine Auswirkungen auf das Ergebnis hatten oder aufgrund der langen Lebensdauer des Systems nicht relevant waren. Andere Elemente konnten unberücksichtigt bleiben, da die Höhe dieser Kosten vernachlässigbar gering ist. Die relevanten Kosten wurden noch einmal zusammenfassend dargestellt und bildeten die Grundlage für weitere Überlegungen. Weiterhin wurden die Zusammensetzung und kostenmäßige Verteilung der Lebenszykluskosten geklärt. Dies wurde innerhalb einer repräsentativen Aufstellung dargestellt. Bei den Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen wurden sowohl die Anschaffungskosten als auch die Kosten für Betrieb und Instandhaltung berücksichtigt.

Zur Bestimmung eines monetären Nutzens wurde das Trassenpreissystem der Deutschen Bahn AG herangezogen. Ausschlaggebend für die Höhe der Trassenpreiseinnahmen ist die Leistungsfähigkeit einer Strecke, die maßgebend durch die Leit- und Sicherungstechnik beeinflusst wird. Subventionen konnten innerhalb dieser Arbeit keine Berücksichtigung finden. Die Festlegung der möglichen Förderprogramme sowie der Förderhöhe waren aufgrund der Annahme einer fiktiven Strecke nicht möglich. Für zukünftige Untersuchungen kann die Betrachtung der Subventionen dennoch relevant sein, da sie sich positiv auf das Gesamtergebnis auswirken.

Neben diesen monetären Faktoren gibt es eine Reihe von Kriterien, die ebenfalls Einfluss auf die Entscheidungsfindung nehmen. Um auch solche nicht monetären Faktoren berücksichtigen zu können, wurde die Durchführung einer Nutzwertanalyse als vorteilhaft erachtet. Der dabei ermittelte Nutzen, den eine Alternative bereithält, beeinflusst wesentlich die Entscheidung für oder gegen eine Leit- und Sicherungstechnik. Dies wird im Rahmen des Anwendungsbeispiels nochmals deutlich.

Anhand verschiedener Verfahren aus dem Kostencontrolling konnten drei Methoden gefunden werden, die zur Bestimmung eines Zielwertes geeignet sind. Um den Umfang dieser Arbeit nicht zu übersteigen, wurde eine Vorgehensweise ausgewählt, die im Rahmen dieser Diplomarbeit zum Einsatz kam. Unter Beachtung der Informationen zu den relevanten Kostenbestandteilen wurde diese Methode für den konkreten Anwendungsfall angepasst. Mit Hilfe dieser Methode wurden die Zielwerte für die Lebenszykluskosten bestimmt.

Innerhalb eines Anwendungsbeispiels wurde die Wirtschaftlichkeit verschiedener ETCS-Modi bestimmt. Mit Hilfe der Kapitalwertmethode wurden ein Barwert der Lebenszykluskosten sowie ein Barwert des Überschusses ermittelt. Die Nutzwertanalyse lieferte weitere Informationen über die gewählten Szenarien, die zusätzlich zu den monetären Faktoren in die Betrachtungen einbezogen wurden. In einem Portfolio wurden die Ergebnisse noch einmal zusammenhängend dargestellt. Die Untersuchungen verdeutlichten, dass ETCS in Zukunft die wirtschaftlichere Technik sein wird und sich gegenüber konventionellen Ausrüstungen durchsetzen wird.

Die Diplomarbeit vermittelt grundlegende Erkenntnisse über die Kosten-Nutzen-Relation von ETCS. Sie bildet eine wesentliche Grundlage zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit dieses zukunftsweisenden Zugsteuerungssystems. Die entwickelten Methoden ermöglichen es die Wirtschaftlichkeit von ETCS permanent zu bestimmen. Mit wachsender Datenbasis können die Ergebnisse präzisiert und weitere monetäre sowie nicht monetäre Faktoren, die für zukünftige Untersuchungen relevant sein könnten, berücksichtigt werden.

Quellenverzeichnis

Achilles, A. (2008):

Die Migration von ETCS aus dem Blickwinkel des Produktlebenszyklus,
in: Eisenbahntechnische Rundschau, H. 10, S. 666 – 667.

AEG (1994):

Allgemeines Eisenbahngesetz,
URL: http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/aeg_1994/gesamt.pdf,
Stand: 11.06.2010.

Bartnicki, K./Rahn, W. H. (2010):

Integration von Relaisstellwerken auf ETCS-Korridoren,
in: Signal & Draht, H. 3, S. 24 – 27.

Böhm, T./Scheier, B. (2010):

Railonomics - für eine bedarfsgerechte Infrastruktur,
in: Eisenbahningenieur, H. 1, S. 32 – 36.

Bormet, J. (2007):

Anforderungen des Betreibers an den Life-cycle in der Fahrweginstandhaltung,
in: Signal & Draht, H. 1 + 2, S. 6 – 16.

Bundesrepublik Deutschland (2009):

Leistungs- und Finanzierungsvereinbarungen. Entwurf vom 10.11.2008,
URL: <http://www.bahn-fuer-alle.de/media/LuFV.pdf>,
Stand: 20.04.2010.

Coenenberg, A. (2003):

Kostenrechnung und Kostenanalyse, 5. überarbeitete Auflage, Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart 2003.

DB AG (2002):

Bahnbetrieb, Infrastruktur gestalten, Streckenstandards,
Konzernrichtlinie 413, gültig ab 01.01.2002.

DB Netz AG (2009):

Trassenpreissystem der DB Netz AG,

URL: http://www.deutschebahn.com/site/shared/de/dateianhaenge/infomaterial/sonstige/db_netz_trassenpreisbroschuere_2010.pdf,

Stand: 12.03.2010.

DB Netz AG (2009a):

Geschäftsbericht 2008,

URL: http://www.deutschebahn.com/site/shared/de/dateianhaenge/berichte/geschaeftsbericht__2008__dbnetz.pdf,

Stand: 28.05.2010.

DB Netz AG (2009b):

Trassenpreissystem (TPS), Liste der Entgelte der DB Netz AG 2010 für Trassen, Zusatz- und Nebenleistungen,

URL: http://fahrweg.dbnetze.com/site/shared/de/dateianhaenge/infomaterial/trasse/trassen__listen__entgelte__tps__2010.pdf,

Stand: 07.08.2010.

DB Netz AG (2008):

Geschäftsbericht 2007,

URL: http://www.deutschebahn.com/site/shared/de/dateianhaenge/berichte/geschaeftsbericht__2007__dbnetz.pdf,

Stand: 28.05.2010.

DB Netz AG (2007):

Geschäftsbericht 2006,

URL: http://www.deutschebahn.com/site/shared/de/dateianhaenge/berichte/geschaeftsbericht__2006__netz.pdf,

Stand: 28.05.2010.

DB Netz AG (o.J.):

Kurzbeschreibung zu den einzelnen ETCS Leistungsstufen (Level),

URL: http://www.deutschebahn.com/site/shared/de/dateianhaenge/infomaterial/netz/etcs__beschreibung__etcs__level.pdf,

Stand: 28.05.2010.

Deutsches Institut für Normung (2005):

Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 3-3: Anwendungsleitfaden,
Lebenszykluskosten (IEC 60300-3-3:2004), DIN EN 60300-3-3,
Deutsche Fassung EN 60300-3-3:2004.

EBO (2008):

Eisenbahn-Bau- und -Betriebsordnung,
URL: <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/ebo/gesamt.pdf>,
Stand: 11.06.2010.

EU-Kommission (2008):

Kommission sorgt für mehr Interoperabilität im europäischen Zugverkehr,
URL: <http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/08/629&format=HTML&aged=1&language=DE&guiLanguage=en>,
Stand: 12.05.2010.

EU-Kommission (2006):

Einführung des Signalgebungssystems ERTMS/ETCS,
URL: http://europa.eu/legislation_summaries/transport/rail_transport/l24458_de.htm,
Stand: 12.05.2010.

Fendrich, L. (2007):

Handbuch Eisenbahninfrastruktur,
Springer Verlag, Berlin 2007.

Fiedler, J. (1999):

Bahnwesen. Planung, Bau und Betrieb von Eisenbahnen, S-, U-, Stadt- und
Straßenbahnen, 4. überarbeitete Auflage, Werner Verlag, Düsseldorf 1999.

Flatscher, F. J. (2009):

Wirtschaftliche Fahrweginstandhaltung für hohe Verfügbarkeit des Fahrweges,
in: Eisenbahningenieur, H. 4, S. 16 – 20.

Gutsche, K. (2010):

Integrierte Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien für die Bahnsicherungstechnik,
in: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Institut für Verkehrssystemtechnik (Hrsg.): Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik, Band 9, Braunschweig 2010.

Hänni, H. (2004):

Workshop ETCS Limited Supervision,
Veranstaltungsunterlagen, Veranstaltung vom 30.04.2004.

Höppner, T. (2009):

Die Regulierung der Netzstruktur, Elektrizität, Gas, Eisenbahn, Telekommunikation,
1. Auflage, Nomos Verlag, Baden-Baden 2009.

Hornemann, K./Fröhlich, B. (2007):

Zugbeeinflussungssysteme der DB AG,
in: Eisenbahn-Ingenieur-Kalender, S. 157 – 178.

Kaufmann, L. (1996):

Komplexitäts-Index-Analyse von Prozessen. Eine Methode zur Ermittlung von Ressourcenbeanspruchungen im Rahmen der Prozess(kosten)kalkulation,
in: Controlling, H. 4, S. 212 – 221.

Krampe, H. (2006):

Handbuch für den Eisenbahnbetriebsleiter. 1. Grundlagen der Eisenbahnternehmen,
Aus- und Weiterbildungszentrum Verkehrsgewerbe Leipzig GmbH,
Leipzig 2006.

Krüger, M. (2003):

Zugsicherung in Deutschland - von der LZB zu ETCS,
in: Eisenbahningenieur, H. 2, S. 27 – 31.

Kruschwitz, L. (2007):

Investitionsrechnung,
11. Auflage, Oldenbourg Verlag, München 2007.

Lackhove, C. (2007):

Modellierung der Einflussparameter für die Strategiewahl bei der Migration neuer Systeme der Produktionssteuerung im Eisenbahnbetrieb, Diplomarbeit, betreut von Huch, B./Lemmer, K.,
Technische Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig 2007.

Lackhove, C./Scheier, B. (2010):

Projektierungsannahmen zur ETCS-Kostenabschätzung,
in: ZEV Rail, voraussichtliche Veröffentlichung August 2010.

Lehr, S./Naumann, T./Schnittenhelm, O. (2007):

Parallele Ausrüstung der Strecke Berlin - Halle/Leipzig mit ETCS und LZB,
in: Eisenbahn-Ingenieur-Kalender, S. 189 – 197.

Lienau, C./Siefers, T. (2007),

Abbildung von Infrastrukturkosten in der Eisenbahnbetriebssimulation,
in: Eisenbahntechnische Rundschau, H. 12, S. 799 – 805.

Lübke, D./Hecht, M. (2008):

Das System Bahn. Handbuch,
1. Auflage, DVV Media Group (Eurailpress), Hamburg 2008.

Müller, C. (2005):

Investitionsrechnung,
URL: [http://wbw.unileoben.ac.at/wbw/wbwsripten.nsf/887ec92cfa76a684c1256c5a00490b88/762fe603df72155ec12570a00022f89f/\\$FILE/Investitionsrechnung%20Handzettel.pdf](http://wbw.unileoben.ac.at/wbw/wbwsripten.nsf/887ec92cfa76a684c1256c5a00490b88/762fe603df72155ec12570a00022f89f/$FILE/Investitionsrechnung%20Handzettel.pdf),
Stand: 18.08.2010.

Müller, D. (2006):

Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre für Ingenieure,
1. Auflage, Springer Verlag, Hamburg 2006.

o.V. (2010):

Äquivalenzziffern,

URL: <http://www.wirtschaftslexikon24.net/d/aequivalenzziffern/aequivalenzziffern.htm>,

Stand: 19.07.2010.

o.V. (2010a):

Kalkulationszinssatz,

URL: <http://www.wirtschaftslexikon24.net/d/kalkulationszinssatz/kalkulationszinssatz.htm>,

Stand: 19.07.2010.

o.V. (o.J.):

ETCS Level 2,

URL: http://www.etcs.eu/funktionsprinzip/etcs_level_2.htm,

Stand: 09.06.2010.

o.V (o.J.a):

SIL (Safety Integrity Level),

URL: http://www.tri-matic.ch/cms/uploads/media/SIL_Safety_Integrity_Level_04.pdf,

Stand: 02.08.2010.

o.V. (o.J.b):

Komplexität,

URL: <http://www.sign-lang.uni-hamburg.de/projekte/slex/seitendvd/konzepte/I52/I5262.htm>,

Stand: 23.08.2010.

Pachl, J. (2004):

Systemtechnik des Schienenverkehrs. Bahnbetrieb planen, steuern und sichern,

4. überarbeitete Auflage, Teubner Verlag, Wiesbaden 2004.

Perridon, L./Steiner, M. (2004):

Finanzwirtschaft der Unternehmung,

13. überarbeitete Auflage, Vahlen Verlag, München 2004.

Ptok, F.-B./Salbert, F. (2007):

Einsparung von Signalen bei ETCS,

in: Eisenbahntechnische Rundschau, H. 11, S. 682 – 688.

Rieble, I. (2006):

Benchmarking in der Instandhaltung der DB Netz AG. Auf der Suche nach der besten Lösung,

in: Eisenbahn-Ingenieur-Kalender, S. 145 – 151.

Rinza, P./Schmitz, H. (1992):

Nutzwert-Kosten-Analyse. Eine Entscheidungshilfe,

2. Auflage, VDI Verlag, Düsseldorf 1992.

Roesch, M./Schwaniger, G./Stahl, K. (2002):

Fahrweginstandhaltung. Planung, Steuerung, Durchführung, Abrechnung und Controlling,

in: Eisenbahn-Ingenieur-Kalender, S. 125 – 138.

Scheier, B. (2010):

Zugsicherungssysteme – Bewertung der Signalaufwertung und der Rückfallebenen, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Verkehrssystemtechnik, Braunschweig 2010.

Scherz, W./Kabisch, J. (2004):

Instandhaltungsstrategie der DB Netz AG. Effizienzsteigerung durch gesamtheitliche Prozessbetrachtung in der Instandhaltung,

in: Eisenbahn-Ingenieur-Kalender, S. 61 – 70.

Schönemann, J. (2009):

Methoden und Kriterien zur Bewertung von Eisenbahninfrastruktur,

Diplomarbeit, betreut von Haase, K.,

Technische Universität, Dresden 2009.

Siemens AG (2010):

Streckenausrüstung Trainguard 100 und 200,
URL: http://www.mobility.siemens.com/mobility/de/pub/fernverkehr/schienenverkehr/bahnautomatisierung/etcs_trainguard/streckenausrustung_trainguard.htm,
Stand: 10.05.2010.

Skiera, B./Gensler, S. (o.J.):

Berechnung von Nutzenfunktionen und Marktsimulationen mit Hilfe der
Conjoint-Analyse,
URL: http://www.marketing.uni-frankfurt.de/fileadmin/Publikationen/Skiera_Gensler_conjoint_01.pdf
Stand: 21.08.2010.

Wegener, M. (2008):

European Train Control System (ETCS),
URL: <http://www.marco-wegener.de/technik/etcs.htm>,
Stand: 10.05.2010.

Weigand, W. (2007):

ETCS - betriebliche Vorteile der unterschiedlichen Funktionsstufen und Betriebsarten,
in: Eisenbahntechnische Rundschau, H. 11, S. 676 – 681.

Wendler, E. (2008):

Influence of ETCS on line capacity, Generic study,
Verkehrswissenschaftliches Institut, Lehrstuhl für Schienenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Paris 2008.

Winter, P. (2005):

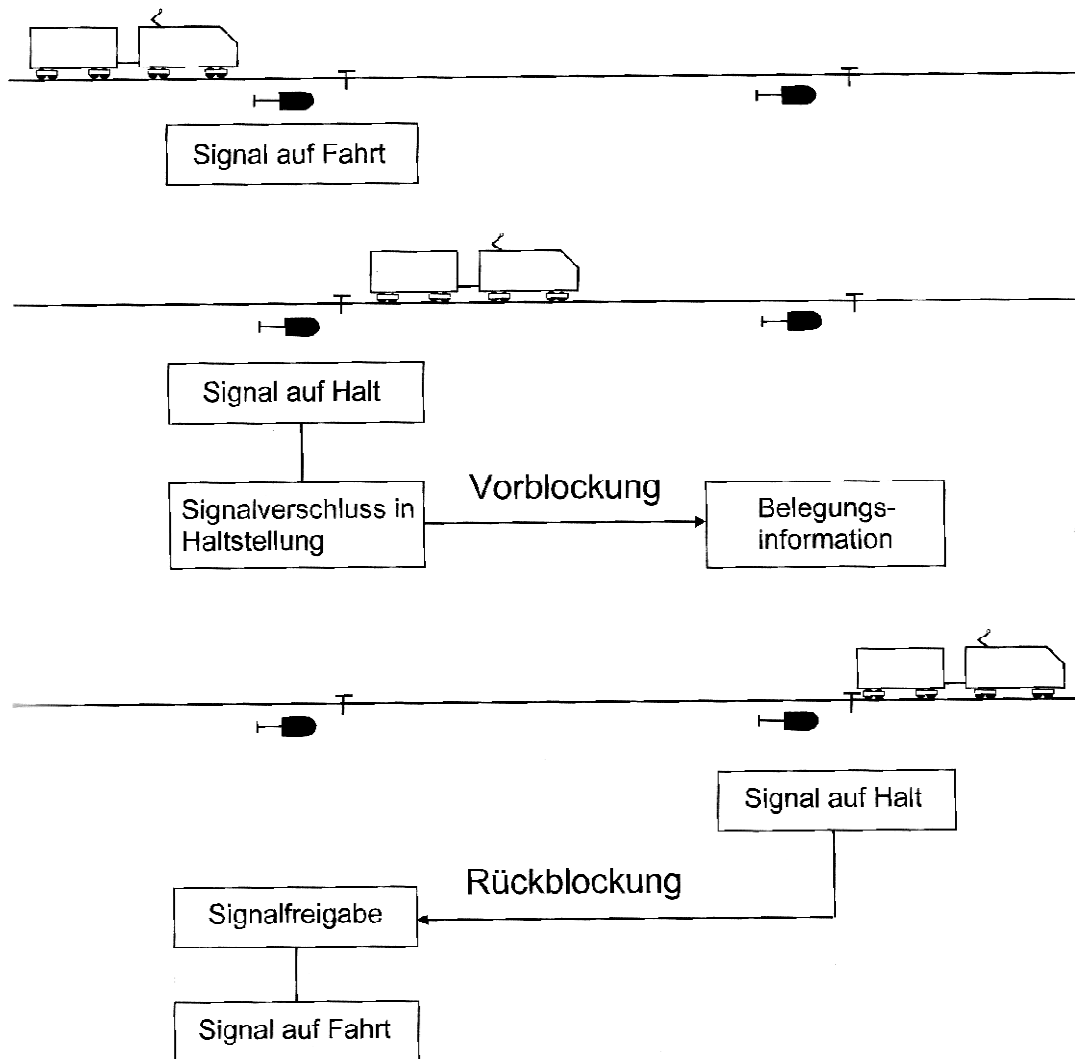
Stand der Entwicklung und Einführung von ETCS,
URL: http://www.dlr.de/fs/Portaldata/16/Resources/dokumente/vk/VP_FS_EX_Vortrag_Winter_050113.pdf,
Stand: 25.08.2010.

Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Folgefahrschutz.....	71
Anlage 2: Gegenfahrschutz	72
Anlage 3: Kaufpreis.....	73
Anlage 4: Anschaffungskosten	74
Anlage 5: Kosten für den GSM-R-Betrieb im ETCS Level 2	74
Anlage 6: Instandhaltungskosten.....	74
Anlage 7: Besitzkosten.....	75
Anlage 8: Barwertbestimmung PZB.....	76
Anlage 9: Barwertbestimmung ETCS Level 1 Full Supervision.....	77
Anlage 10: Barwertbestimmung ETCS Level 1 Limited Supervision	78
Anlage 11: Barwertbestimmung ETCS Level 2.....	79
Anlage 12: Erzielbare Trassenentgelte.....	80
Anlage 13: Stellwerkskosten	80
Anlage 14: Matrixverfahren	81

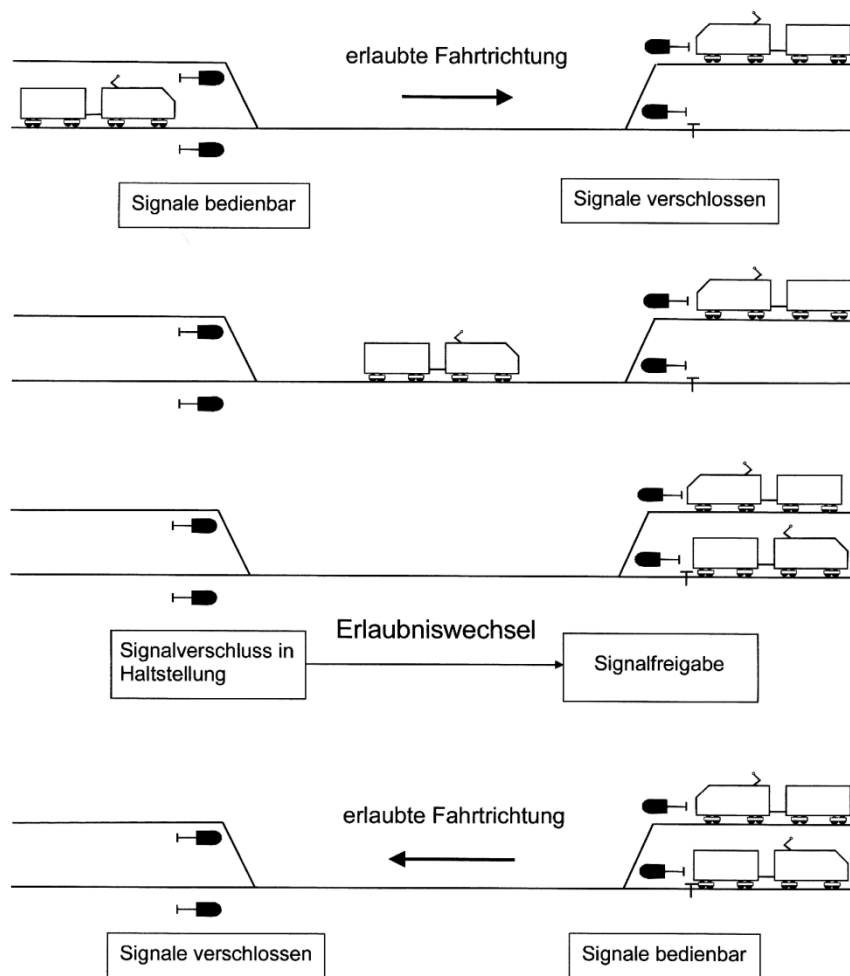
Anlagen

Anlage 1: Folgefahrschutz



Quelle: Pacht, J. (2004), S. 63

Anlage 2: Gegenfahrschutz



Quelle: Pahl, J. (2004), S. 65

Anlage 3: Kaufpreis

	Kostensätze	Anzahl Elemente Strecke	Anzahl Elemente Bahnhöfe	Ges.zahl Elemente	Hardware- Kosten	Projektie- rungskosten	Kaufpreis
PZB							
PZB- Magnete	1.200 €			344	412.800 €		
Signale	27.000 €			190	5.130.000 €		
Summe					5.542.800 €		
							5.542.800 €
Level 1 FS							
Balisen	2.000 €	396	528	924	1.848.000 €		
LEU	16.500 €	132	143	275	4.537.500 €		
Fahrstraßen	15.000 €		156	156		2.340.000 €	
Linking	1.000 €			924		924.000 €	
Blöcke	10.000 €			33		330.000 €	
Summe					6.385.500 €	3.594.000 €	
							9.979.500 €
Level 1 LS							
Balisen	2.000 €	396	326	722	1.444.000 €		
LEU	16.500 €	132	143	275	4.537.500 €		
Summe					5.981.500 €		
							5.981.500 €
Level 2							
Balisen	2.000 €	396	326	722	1.444.000 €		
Fahrstraßen	15.000 €		156	156		2.340.000 €	
Linking	1.000 €	396	326	722		722.000 €	
Blöcke	10.000 €			33		330.000 €	
RBC	3.000.000 €			4		12.000.000 €	
Summe					1.444.000 €	15.392.000 €	
							16.836.000 €

Quelle: Lackhove, C./Scheier, B. (2010)

Anlage 4: Anschaffungskosten

		PZB	Level 1 FS	Level 1 LS	Level 2
F & E	25%	2.309.500,00 €	4.158.125,00 €	2.492.291,67 €	7.015.000,00 €
Fertigung	35%	3.233.300,00 €	5.821.375,00 €	3.489.208,33 €	9.821.000,00 €
Kaufpreis		5.542.800,00 €	9.979.500,00 €	5.981.500,00 €	16.836.000,00 €
Proj. & Bau	25%	2.309.500,00 €	4.158.125,00 €	2.492.291,67 €	7.015.000,00 €
Betrieb & IH	15%	1.385.700,00 €	2.494.875,00 €	1.495.375,00 €	4.209.000,00 €
Anschaffungspreis		9.238.000,00 €	16.632.500,00 €	9.969.166,67 €	28.060.000,00 €
Anschaffungskosten		7.852.300,00 €	14.137.625,00 €	8.473.791,67 €	23.851.000,00 €

Quelle: Vgl. Bormet, J. (2007); eigene Darstellung

Anlage 5: Kosten für den GSM-R-Betrieb im ETCS Level 2

	Preise für ein EVU		abzgl. 9 % Rendite	jährlich pro Zug	gesamt (116,8 Züge)
Telefonie	11,95 €	pro Monat	10,87 €		
Datenübertragung	4,10 €	pro Monat	3,73 €		
		Summe	14,60 €	175,20 €	20.463,36 €

Quelle: DB Netz AG (2009b), S. 12; eigene Darstellung

Anlage 6: Instandhaltungskosten

	Dauer [h/Jahr]	Anzahl Elemente	Personal-kosten [€/Jahr]	Material-aufwand [€/Jahr]	Gesamt-kosten	IH-Kosten
PZB						
PZB	1,25	344	47,00 €	6,50 €	18.404,00 €	
Signale	2,92	190	110,00 €	0,50 €	20.995,00 €	39.399,00 €
Level 1 FS						
Balisen	0,02	924	0,70 €	6,50 €	6.652,80 €	
LEU	0,5	275	20,00 €		5.500,00 €	
Signale	2,92	190	110,00 €	0,50 €	20.995,00 €	33.147,80 €
Level 1 LS						
Balisen	0,02	722	0,70 €	6,50 €	5.198,40 €	
LEU	0,5	275	20,00 €		5.500,00 €	
Signale	2,92	190	110,00 €	0,50 €	20.995,00 €	31.693,40 €
Level 2						
Balisen	0,02	722	0,70 €	6,50 €	5.198,40 €	5.198,40 €

Quelle: Institut für Verkehrssystemtechnik DLR Braunschweig; eigene Darstellung

Anlage 7: Besitzkosten

	PZB	Level 1 FS	Level 1 LS	Level 2
15 % des Anschaffungspreises	69.285,00 €	124.743,75 €	74.768,75 €	210.450,00 €
Instandhaltungskosten	39.399,00 €	33.147,80 €	31.693,40 €	5.198,40 €
Betrieb GSM-R				20.463,36 €
Besitzkosten	108.684,00 €	157.891,55 €	106.462,15 €	236.111,76 €

Quelle: eigene Darstellung

Anlage 8: Barwertbestimmung PZB

PZB										
Jahr	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
K _A	7.852.300,00 €									
K _B		108.684,00 €	108.684,00 €	108.684,00 €	108.684,00 €	108.684,00 €	108.684,00 €	108.684,00 €	108.684,00 €	108.684,00 €
(i = 8%)	1,000	0,926	0,857	0,794	0,735	0,681	0,630	0,583	0,540	0,500
Barwert	7.852.300,00 €	100.633,33 €	93.179,01 €	86.276,86 €	79.885,98 €	73.968,50 €	68.489,36 €	63.416,07 €	58.718,58 €	54.369,06 €
LCC	8.919.375,53									

TE		3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €
Saldo	-7.852.300,00 €	3.247.938,87 €	3.247.938,87 €	3.247.938,87 €	3.247.938,87 €	3.247.938,87 €	3.247.938,87 €	3.247.938,87 €	3.247.938,87 €	3.247.938,87 €
(i = 8%)	1,000	0,926	0,857	0,794	0,735	0,681	0,630	0,583	0,540	0,500
Barwert	-7.852.300,00 €	3.007.350,805 €	2.784.584,079 €	2.578.318,592 €	2.387.332,029 €	2.210.492,620 €	2.046.752,426 €	1.895.141,135 €	1.754.760,310 €	1.624.778,065 €
Überschuss	24.036.442,60 €									

10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
108.684,00 €	108.684,00 €	108.684,00 €	108.684,00 €	108.684,00 €	108.684,00 €	108.684,00 €	108.684,00 €	108.684,00 €	108.684,00 €	108.684,00 €
0,463	0,429	0,397	0,368	0,340	0,315	0,292	0,270	0,250	0,232	0,215
50.341,72	46.612,70 €	43.159,91 €	39.962,88 €	37.002,67 €	34.261,73 €	31.723,82 €	29.373,91 €	27.198,07 €	25.183,39 €	23.317,96 €

3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €
3.247.938,87 €	3.247.938,87 €	3.247.938,87 €	3.247.938,87 €	3.247.938,87 €	3.247.938,87 €	3.247.938,87 €	3.247.938,87 €	3.247.938,87 €	3.247.938,87 €	3.247.938,87 €
0,463	0,429	0,397	0,368	0,340	0,315	0,292	0,270	0,250	0,232	0,215
1.504.424,134 €	1.392.985,309 €	1.289.801,212 €	1.194.260,382 €	1.105.796,650 €	1.023.885,787 €	948.042,395 €	877.817,033 €	812.793,549 €	752.586,619 €	696.839,462 €

Quelle: eigene Darstellung

Anlage 9: Barwertbestimmung ETCS Level 1 Full Supervision

Level 1 FS										
Jahr	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
K _A	14.137.625,00 €									
K _B		157.891,55 €	157.891,55 €	157.891,55 €	157.891,55 €	157.891,55 €	157.891,55 €	157.891,55 €	157.891,55 €	157.891,55 €
(i = 8%)	1,000	0,926	0,857	0,794	0,735	0,681	0,630	0,583	0,540	0,500
Barwert	14.137.625,00 €	146.195,88 €	135.366,56 €	125.339,40 €	116.055,00 €	107.458,34 €	99.498,46 €	92.128,20 €	85.303,89 €	78.985,08 €
LCC	15.687.827,51									

TE		3.064.974,64 €	3.064.974,64 €	3.064.974,64 €	3.064.974,64 €	3.064.974,64 €	3.064.974,64 €	3.064.974,64 €	3.064.974,64 €	3.064.974,64 €
Saldo	-14.137.625,00 €	2.907.083,09 €	2.907.083,09 €	2.907.083,09 €	2.907.083,09 €	2.907.083,09 €	2.907.083,09 €	2.907.083,09 €	2.907.083,09 €	2.907.083,09 €
(i = 8%)	1,000	0,926	0,857	0,794	0,735	0,681	0,630	0,583	0,540	0,500
Barwert	-14.137.625,00 €	2.691.743,604 €	2.492.355,189 €	2.307.736,286 €	2.136.792,858 €	1.978.511,905 €	1.831.955,468 €	1.696.255,063 €	1.570.606,540 €	1.454.265,315 €
Überschuss	14.404.545,33 €									

10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
157.891,55 €	157.891,55 €	157.891,55 €	157.891,55 €	157.891,55 €	157.891,55 €	157.891,55 €	157.891,55 €	157.891,55 €	157.891,55 €	157.891,55 €
0,463	0,429	0,397	0,368	0,340	0,315	0,292	0,270	0,250	0,232	0,215
73.134,34 €	67.716,98 €	62.700,91 €	58.056,40 €	53.755,92 €	49.774,00 €	46.087,04 €	42.673,18 €	39.512,21 €	36.585,38 €	33.875,35 €

3.064.974,64 €	3.064.974,64 €	3.064.974,64 €	3.064.974,64 €	3.064.974,64 €	3.064.974,64 €	3.064.974,64 €	3.064.974,64 €	3.064.974,64 €	3.064.974,64 €	3.064.974,64 €
2.907.083,09 €	2.907.083,09 €	2.907.083,09 €	2.907.083,09 €	2.907.083,09 €	2.907.083,09 €	2.907.083,09 €	2.907.083,09 €	2.907.083,09 €	2.907.083,09 €	2.907.083,09 €
0,463	0,429	0,397	0,368	0,340	0,315	0,292	0,270	0,250	0,232	0,215
1.346.541,958 €	1.246.798,109 €	1.154.442,694 €	1.068.928,420 €	989.748,537 €	916.433,831 €	848.549,843 €	785.694,299 €	727.494,722 €	673.606,224 €	623.709,466 €

Quelle: eigene Darstellung

Anlage 10: Barwertbestimmung ETCS Level 1 Limited Supervision

Level 1 LS										
Jahr	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
K _A	8.473.791,67 €									
K _B		106.462,15 €	106.462,15 €	106.462,15 €	106.462,15 €	106.462,15 €	106.462,15 €	106.462,15 €	106.462,15 €	106.462,15 €
(i = 8%)	1,000	0,926	0,857	0,794	0,735	0,681	0,630	0,583	0,540	0,500
Barwert	8.473.791,67 €	98.576,06 €	91.274,13 €	84.513,09 €	78.252,86 €	72.456,35 €	67.089,21 €	62.119,64 €	57.518,19 €	53.257,58 €
LCC	9.519.052,75									

TE		3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €
Saldo	-8.473.791,67 €	3.250.160,72 €	3.250.160,72 €	3.250.160,72 €	3.250.160,72 €	3.250.160,72 €	3.250.160,72 €	3.250.160,72 €	3.250.160,72 €	3.250.160,72 €
(i = 8%)	1,000	0,926	0,857	0,794	0,735	0,681	0,630	0,583	0,540	0,500
Barwert	-8.473.791,67 €	3.009.408,074 €	2.786.488,957 €	2.580.082,368 €	2.388.965,155 €	2.212.004,773 €	2.048.152,568 €	1.896.437,563 €	1.755.960,706 €	1.625.889,543 €
Überschuss	23.436.765,38 €									

10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
106.462,15 €	106.462,15 €	106.462,15 €	106.462,15 €	106.462,15 €	106.462,15 €	106.462,15 €	106.462,15 €	106.462,15 €	106.462,15 €	106.462,15 €
0,463	0,429	0,397	0,368	0,340	0,315	0,292	0,270	0,250	0,232	0,215
49.312,57 €	45.659,79 €	42.277,58 €	39.145,91 €	36.246,21 €	33.561,31 €	31.075,29 €	28.773,41 €	26.642,05 €	24.668,56 €	22.841,26 €

3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €	3.356.622,87 €
3.250.160,72 €	3.250.160,72 €	3.250.160,72 €	3.250.160,72 €	3.250.160,72 €	3.250.160,72 €	3.250.160,72 €	3.250.160,72 €	3.250.160,72 €	3.250.160,72 €	3.250.160,72 €
0,463	0,429	0,397	0,368	0,340	0,315	0,292	0,270	0,250	0,232	0,215
1.505.453,281 €	1.393.938,223 €	1.290.683,540 €	1.195.077,351 €	1.106.553,103 €	1.024.586,207 €	948.690,932 €	878.417,530 €	813.349,565 €	753.101,449 €	697.316,156 €

Quelle: eigene Darstellung

Anlage 11: Barwertbestimmung ETCS Level 2

Level 2										
Jahr	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
K _A	23.851.000,00 €									
K _B		236.111,76 €	236.111,76 €	236.111,76 €	236.111,76 €	236.111,76 €	236.111,76 €	236.111,76 €	236.111,76 €	236.111,76 €
(i = 8%)	1,000	0,926	0,857	0,794	0,735	0,681	0,630	0,583	0,540	0,500
Barwert	23.851.000,00 €	218.622,00 €	202.427,78 €	187.433,13 €	173.549,19 €	160.693,70 €	148.790,46 €	137.768,94 €	127.563,84 €	118.114,66 €
LCC	26.169.180,06									

TE		3.179.685,37 €	3.179.685,37 €	3.179.685,37 €	3.179.685,37 €	3.179.685,37 €	3.179.685,37 €	3.179.685,37 €	3.179.685,37 €	3.179.685,37 €
Saldo	-23.851.000,00 €	2.943.573,61 €	2.943.573,61 €	2.943.573,61 €	2.943.573,61 €	2.943.573,61 €	2.943.573,61 €	2.943.573,61 €	2.943.573,61 €	2.943.573,61 €
(i = 8%)	1,000	0,926	0,857	0,794	0,735	0,681	0,630	0,583	0,540	0,500
Barwert	-23.851.000,00 €	2.725.531,119 €	2.523.639,925 €	2.336.703,635 €	2.163.614,476 €	2.003.346,737 €	1.854.950,683 €	1.717.546,929 €	1.590.321,230 €	1.472.519,658 €
Überschuss	5.049.439,60 €									

10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
236.111,76 €	236.111,76 €	236.111,76 €	236.111,76 €	236.111,76 €	236.111,76 €	236.111,76 €	236.111,76 €	236.111,76 €	236.111,76 €	236.111,76 €
0,463	0,429	0,397	0,368	0,340	0,315	0,292	0,270	0,250	0,232	0,215
109.365,43 €	101.264,29 €	93.763,23 €	86.817,80 €	80.386,86 €	74.432,27 €	68.918,77 €	63.813,68 €	59.086,74 €	54.709,94 €	50.657,35 €

3.179.685,37 €	3.179.685,37 €	3.179.685,37 €	3.179.685,37 €	3.179.685,37 €	3.179.685,37 €	3.179.685,37 €	3.179.685,37 €	3.179.685,37 €	3.179.685,37 €	3.179.685,37 €
2.943.573,61 €	2.943.573,61 €	2.943.573,61 €	2.943.573,61 €	2.943.573,61 €	2.943.573,61 €	2.943.573,61 €	2.943.573,61 €	2.943.573,61 €	2.943.573,61 €	2.943.573,61 €
0,463	0,429	0,397	0,368	0,340	0,315	0,292	0,270	0,250	0,232	0,215
1.363.444,127 €	1.262.448,266 €	1.168.933,580 €	1.082.345,907 €	1.002.172,136 €	927.937,163 €	859.201,077 €	795.556,553 €	736.626,438 €	682.061,516 €	631.538,441 €

Quelle: eigene Darstellung

Anlage 12: Erzielbare Trassenentgelte

		Trassenpreis	Entgelt/Tag	Entgelt/Jahr	Summe
PZB	Personennahverkehrs-Takt-Trasse	4,42 €	35.995,08 €	13.138.204,20 €	
	Personenfernverkehrs-Takt-Trasse	4,42 €	29.450,52 €	10.749.439,80 €	
	Güterverkehrs-Standard-Trasse	2,68 €	26.424,80 €	9.645.052,00 €	33.532.696,00 €
Level 1 FS	Personennahverkehrs-Takt-Trasse	4,42 €	32.855,46 €	11.992.242,90 €	
	Personenfernverkehrs-Takt-Trasse	4,42 €	26.885,76 €	9.813.302,40 €	
	Güterverkehrs-Standard-Trasse	2,68 €	24.146,80 €	8.813.582,00 €	30.619.127,30 €
Level 1 LS	Personennahverkehrs-Takt-Trasse	4,42 €	35.995,08 €	13.138.204,20 €	
	Personenfernverkehrs-Takt-Trasse	4,42 €	29.450,52 €	10.749.439,80 €	
	Güterverkehrs-Standard-Trasse	2,68 €	26.424,80 €	9.645.052,00 €	33.532.696,00 €
Level 2	Personennahverkehrs-Takt-Trasse	4,42 €	34.093,62 €	12.444.171,30 €	
	Personenfernverkehrs-Takt-Trasse	4,42 €	27.902,82 €	10.184.529,30 €	
	Güterverkehrs-Standard-Trasse	2,68 €	25.031,20 €	9.136.388,00 €	31.765.088,60 €

Quelle: eigene Darstellung

Anlage 13: Stellwerkskosten

ESTW		Anzahl der Elemente	Personal-kosten [€/Stunde]	Betriebs-stunden	Gesamt-kosten	Gesamt-K _B	ND 20 Jahre
Betrieb		1	25,00 €	8760	219.000,00 €		
	Dauer [h/Jahr]		Personal-kosten [€/Jahr]	Material-kosten [€/Jahr]			
IH	166,67	1	6.200,00 €	120,00 €	6.320,00 €	225.320,00 €	4.506.400,00 €

Quelle: Institut für Verkehrssystemtechnik DLR Braunschweig; eigene Darstellung

Anlage 14: Matrixverfahren

Kriterium	Sicherheit	Leistungs- fähigkeit	Höchstge- schwindigkeit	Signal- aufwertung	Inter- operabilität	Rückfall- ebene	Punkte	Gewicht.
Sicherheit								
Leistungsfähigkeit								
Höchstgeschw.								
Signalaufwertung								
Interoperabilität								
Rückfallebene								
						Summe:		

0 = viel unwichtiger - 1 = unwichtiger - 2 = gleich wichtig - 3 = wichtiger - 4 = viel wichtiger

Anwendung

paarweiser Vergleich der einzelnen Kriterien; z.B. Sicherheit ist viel wichtiger als Leistungsfähigkeit, dann steht in der Zeile Sicherheit unter der Spalte Leistungsfähigkeit eine 4 und in der Zeile Leistungsfähigkeit unter der Spalte Sicherheit eine 0

Gewichtung ScB

Kriterium	Sicher- heit	Leistungs- fähigkeit	Höchstge- schwind.	Signal- aufwertung	Inter- operabilität	Rückfall- ebene	Punkte	Ge- wicht.
Sicherheit		3	4	4	4	4	19	31,67
Leistungsfähig.	1		4	4	2	3	14	23,33
Höchstgeschw.	0	0		2	1	2	5	8,33
Signalaufwert.	0	0	2		1	1	4	6,67
Interoperabilität	0	2	3	3		2	10	16,67
Rückfallebene	0	1	2	3	2		8	13,33
						Summe:	60	100,00

Gewichtung BoT

Kriterium	Sicher- heit	Leistungs- fähigkeit	Höchstge- schwind.	Signal- aufwertung	Inter- operabilität	Rückfall- ebene	Punkte	Ge- wicht.
Sicherheit		3	4	4	4	4	19	31,67
Leistungsfähig.	1		4	3	3	3	14	23,33
Höchstgeschw.	0	0		2	1	3	6	10,00
Signalaufwert.	0	1	2		1	3	7	11,67
Interoperabilität	0	1	3	3		3	10	16,67
Rückfallebene	0	1	1	1	1		4	6,67
						Summe:	60	100,00

Gewichtung GrM

Kriterium	Sicher- heit	Leistungs- fähigkeit	Höchstge- schwind.	Signal- aufwertung	Inter- operabilität	Rückfall- ebene	Punkte	Ge- wicht.
Sicherheit		4	4	4	4	4	20	33,33
Leistungsfähig.	0		3	2	3	1	9	15,00
Höchstgeschw.	0	1		1	3	1	6	10,00
Signalaufwert.	0	2	3		3	1	9	15,00
Interoperabilität	0	1	1	1		1	4	6,67
Rückfallebene	0	3	3	3	3		12	20,00
						Summe:	60	100,00

Gewichtung PeM

Kriterium	Sicherheit	Leistungsfähigkeit	Höchstgeschwind.	Signalaufwertung	Interoperabilität	Rückfallebene	Punkte	Gewicht.
Sicherheit		4	4	4	4	4	20	33,33
Leistungsfähig.	0		3	2	3	2	10	16,67
Höchstgeschw.	0	1		2	3	1	7	11,67
Signalaufwert.	0	2	2		3	1	8	13,33
Interoperabilität	0	1	1	1		1	4	6,67
Rückfallebene	0	2	3	3	3		11	18,33
						Summe:	60	100,00

Gewichtung KoJ

Kriterium	Sicherheit	Leistungsfähigkeit	Höchstgeschwind.	Signalaufwertung	Interoperabilität	Rückfallebene	Punkte	Gewicht.
Sicherheit		3	3	3	3	3	15	25,00
Leistungsfähig.	1		2	2	2	3	10	16,67
Höchstgeschw.	1	2		4	3	4	14	23,33
Signalaufwert.	1	2	0		2	1	6	10,00
Interoperabilität	1	2	1	2		2	8	13,33
Rückfallebene	1	1	0	3	2		7	11,67
						Summe:	60	100,00

Gewichtung LaC

Kriterium	Sicherheit	Leistungsfähigkeit	Höchstgeschwind.	Signalaufwertung	Interoperabilität	Rückfallebene	Punkte	Gewicht.
Sicherheit		3	4	4	3	3	17	28,33
Leistungsfähig.	1		3	3	2	2	11	18,33
Höchstgeschw.	0	1		1	1	1	4	6,67
Signalaufwert.	0	1	3		1	2	7	11,67
Interoperabilität	1	2	3	3		3	12	20,00
Rückfallebene	1	2	3	2	1		9	15,00
						Summe:	60	100,00

Gewichtung SuT

Kriterium	Sicherheit	Leistungsfähigkeit	Höchstgeschwind.	Signalaufwertung	Interoperabilität	Rückfallebene	Punkte	Gewicht.
Sicherheit		3	4	4	4	4	19	31,67
Leistungsfähig.	1		3	4	3	4	15	25,00
Höchstgeschw.	0	1		3	2	1	7	11,67
Signalaufwert.	0	0	1		1	1	3	5,00
Interoperabilität	0	1	2	3		2	8	13,33
Rückfallebene	0	0	3	3	2		8	13,33
						Summe:	60	100,00

Gewichtung HtE

Kriterium	Sicherheit	Leistungsfähigkeit	Höchstgeschwind.	Signalaufwertung	Interoperabilität	Rückfallebene	Punkte	Gewicht.
Sicherheit		3	4	4	4	4	19	31,67
Leistungsfähig.	1		2	2	3	3	11	18,33
Höchstgeschw.	0	2		3	2	1	8	13,33
Signalaufwert.	0	2	1		2	1	6	10,00
Interoperabilität	0	1	2	2		1	6	10,00
Rückfallebene	0	1	3	3	3		10	16,67
						Summe:	60	100,00

Quelle: Experten des Instituts für Verkehrssystemtechnik DLR Braunschweig; eigene Darstellung

Eidesstattliche Erklärung

„Ich versichere an Eides statt, dass ich die vorliegende Studienabschlussarbeit selbständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie alle wörtlich oder sinngemäß übernommenen Stellen in der Arbeit gekennzeichnet habe.

Ferner gestatte ich der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, die vorliegende Studienabschlussarbeit unter Beachtung insbesondere datenschutz- und wettbewerbsrechtlicher Vorschriften für Lehre und Forschung zu nutzen.“

Elsterwerda, den 04.10.2010

Ort, Datum

Unterschrift

